



MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

**DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE**  
Núcleo de Águas Subterrâneas



**GESTÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL DA QUALIDADE DAS  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL**  
Contributos para um Bom estado em 2015

**Teresa Barbosa Eira Leitão de Lobo Ferreira**



Programas de Investigação e de Pós-graduação apresentados para a obtenção do título de  
*Habilitado para o exercício de funções de coordenação de investigação científica*  
LNEC, 2010



# GESTÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL

Contributos para um Bom estado em 2015

---

## RESUMO

---

O presente Programa de Investigação e de Pós-graduação destina-se à prestação de provas públicas no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, para obtenção do título de *Habilitado para o exercício de funções de coordenação de investigação científica*, nos termos do disposto no Decreto-Lei n.º 124/99, de 20 de Abril, que regula o Estatuto da Carreira de Investigação Científica.

O Programa insere-se no Grupo de Áreas Científicas de "Hidráulica e Ambiente", na Área Científica designada por "Engenharia de Recursos Hídricos e Obras Hidráulicas". A temática seleccionada intitula-se **Gestão integrada e sustentável da qualidade das águas subterrâneas em Portugal: contributos para um Bom estado em 2015**.

O Programa de Investigação inclui, de acordo com o disposto no n.º 3 do art. 30.º do referido Decreto-Lei, uma síntese dos conhecimentos existentes sobre o tema abordado, uma apresentação crítica dos problemas já tratados e dos problemas em aberto, bem como um Programa de Estudos relativo a alguns desses problemas, e propõe uma metodologia, os meios necessários, os objectivos a atingir e os benefícios esperados da sua realização.

O Programa de Investigação é apresentado em dez capítulos que constituem a **Parte A** deste trabalho. O **Capítulo 1** apresenta uma análise dos grandes desafios que se colocam à gestão integrada e sustentável da água no século XXI, com enfoque nas questões das águas subterrâneas. O **Capítulo 2** sistematiza uma análise das exigências impostas pelo actual quadro legislativo em relação à temática do Programa. O **Capítulo 3** apresenta os conceitos teóricos subjacentes a uma gestão integrada de águas subterrâneas. O **Capítulo 4** apresenta uma análise das características e do estado dos recursos hídricos subterrâneos de Portugal e selecciona três vertentes estratégicas para reflexão e aprofundamento em relação à temática qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. Nos **Capítulos 5 a 9** analisa-se o estado da arte nestes diferentes domínios, a respectiva situação em Portugal, identificam-se os potenciais

aspectos de causa - efeito dessas pressões e seus potenciais impactes nas massas de água, apresentam-se as principais conclusões de projectos UE e internacionais e, por fim, no **Capítulo 10** propõe-se, com base nas principais necessidades de investigação identificadas em cada domínio, as prioridades de investigação a serem ultrapassadas através de oito Programas de Estudos, nomeadamente em três linhas de actuação:

- actividades potencialmente poluidoras (agricultura, golfe, estradas, aeroportos, lixeiras);
- pressões causadas por catástrofes 'naturais', como o caso dos fogos florestais;
- mudanças impostas pelas alterações climáticas.

O Programa de Pós-graduação é apresentado na **Parte B** deste documento, no **Capítulo 11**. Nele se explicita e delinea as oportunidades de formação decorrentes da execução do programa de investigação e se indica formas de as concretizar, através da apresentação do enquadramento científico, das linhas-mestras e dos meios humanos e materiais para realização de quatro planos de dissertações de mestrado e de quatro teses de doutoramento que se propõe venham a ser desenvolvidos no âmbito dos projectos.

Por último, o **Capítulo 12** apresenta um conjunto de considerações finais onde se sintetizam os objectivos e benefícios a alcançar com o presente Programa e se analisa a sua exequibilidade em termos de recursos humanos e financeiros.

Neste Programa procura-se seguir a estratégia e rumo de actuação do Núcleo de Águas Subterrâneas, actualizando-a face às novas exigências impostas pela legislação mais recente, indo ao encontro das respostas necessárias às mudanças ambientais em curso (*e.g.* alterações climáticas) e enquadrando-a nas grandes linhas temáticas e de financiamento dos programas da União Europeia em matéria de I&D (7.º Programa-Quadro) para o período 2007-2013 e no Plano de Investigação Programada quadrienal (PIP) do LNEC para o período 2009-2012.

Os objectivos do Programa de Estudos e de Pós-graduação apresentados são propor um conjunto de linhas de investigação e de desenvolvimento que contribua para proteger, melhorar e reabilitar a qualidade das massas de águas subterrâneas das principais origens de contaminação e de deterioração a que estão, ou possam vir a estar, sujeitas. As principais linhas de força dos programas visam contribuir com respostas que permitam assegurar a redução global da poluição e/ou a manutenção da qualidade das águas, tendo em vista alcançar um Bom estado das águas subterrâneas (químico e quantitativo) em 2015.

# INTEGRATED AND SUSTAINABLE MANAGEMENT OF GROUNDWATER QUALITY IN PORTUGAL

Contribution for a *Good* status in 2015

---

## ABSTRACT

---

This document includes a Research Program and a Post-graduate Program for a public examination in Laboratório Nacional de Engenharia Civil, with the objective of obtaining the title *Habilitated for Functions of Scientific Research*, as stated in the Decree-Law n. 124/99, April 20<sup>th</sup>, that rules the Statute of the Portuguese Scientific Research Career.

The Program focus is within the scientific areas of "Hydraulics and Environment" and "Water Resources Engineering and Hydraulic Works". The theme chosen was "**Integrated and sustainable management of groundwater quality in Portugal. Contribution for a Good status in 2015**".

The Research Program includes a critical review of the problems and solutions associated with integrated and sustainable management of groundwater quality in Portugal, using comparisons with state-of-the-art approaches to groundwater management. A Programme of Studies was also developed that details the further research required for some of these problems, establishes objectives to attain and a methodology to be followed (including the facilities needed), and describes the benefits expected from developing these Programmes.

The Research Program is presented in ten chapters that together form **Part A** of the study. **Chapter 1** presents an analysis of the major challenges posed by an integrated and sustainable management of water in the XXI century, particularly for groundwater. **Chapter 2** systematises a view of the existing legislation framework relating to groundwater quality. **Chapter 3** presents a summary of the background theory necessary for integrated groundwater management. **Chapter 4** analyses the main characteristics and current state of the Portuguese groundwater resources, and selects three strategic groundwater quality topics to be analysed and further researched. In **Chapters 5 to 9** these three strategic topics are detailed regarding state-of-the-art approaches to these topics and their adoption in Portugal. The causes of pressures on groundwater quality within these three topics are discussed, as well as the actual and potential effects of these pressures. Also, the main outcomes of European Union and other international

research projects on groundwater quality are discussed along with their proposed future research direction. In **Chapter 10** addresses the research priorities with a proposal for eight Programmes of Studies, in three research lines:

- ◆ polluting activities (e.g. agriculture, golf, roads, airports, landfills),
- ◆ pressures caused by 'natural' hazards like forest fires,
- ◆ modifications caused by climate changes.

The Post-graduate Program is presented in **Part B** of this document (Chapter 11). **Chapter 11** examines the opportunities for graduates from the Research Program development. The Post-graduate Program is a plan for the development of five Masters degrees and three PhD theses, within the framework of the groundwater quality Research Program. A scientific framework for the subject is presented, with the main research lines to be developed, and the personal and material facilities needed.

Finally, **Chapter 12** presents the aims and benefits to be attained within the present Research Program, Part A and B, as well as its feasibility with regards to personnel and finances.

This Research Program follows the strategy and objectives of the Groundwater Division. The strategy was updated to reflect recent legislation, and considers the ongoing environmental changes (e.g. climate changes). The strategy is designed in the spirit of the priorities, objectives and policy relevance of the research topics of the 7<sup>th</sup> Framework Programme for Research, Technological Development and Demonstration Activities (7<sup>th</sup> Framework Programme 2007-2013), which will be reflected in the *Plano de Investigação Programada quadrienal (PIP)* of LNEC for 2009-2012.

The aim of the Research Program and the Post-graduate Program is to propose a plan for research and development that contributes to the prevention of further deterioration in groundwater quality, and to protect and enhance the quality of groundwater bodies from the main sources of contamination. The strategic focus is the reduction of pollution and/or the maintenance of groundwater quality in order to reach a Good status of groundwater (chemical and quantitative) by 2015.

# GESTÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL

Contributos para um Bom estado em 2015

---

## ÍNDICE DO TEXTO

---

<b>PARTE A - PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OS GRANDES DESAFIOS DA GESTÃO INTEGRADA E UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA NO SÉCULO XXI .....	2
1.3 RAZÕES PARA A ESCOLHA DO TEMA .....	6
1.4 OBJECTIVOS E ESTRUTURA DO PROGRAMA .....	8
<b>2 ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO E METAS A ATINGIR .....</b>	<b>11</b>
<b>3 CONCEITOS TEÓRICOS PARA A GESTÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....</b>	<b>27</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	27
3.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: UMA PARTE DO CICLO HIDROLÓGICO .....	27
3.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE QUANTIDADE E DE QUALIDADE.....	30
3.3.1 Meio subterrâneo .....	30
3.3.2 Escoamento subterrâneo .....	31
3.3.3 Qualidade da água.....	34
3.3.4 Modelação.....	36
3.4 INTERACÇÃO SOLO – ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – ÁGUAS SUPERFICIAIS .....	38
3.4.1 Considerações gerais .....	38
3.4.2 Ocupação do solo – águas subterrâneas .....	38
3.4.3 Águas superficiais – águas subterrâneas .....	43
3.5 METODOLOGIA DPSIR.....	44
3.6 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE .....	46
3.7 MONITORIZAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	49
3.7.1 Aspectos gerais da monitorização físico-química .....	49
3.7.2 Utilização de isótopos ambientais.....	51
3.8 PLANEAMENTO E GESTÃO INTEGRADOS: PLANOS DE GESTÃO DE REGIÃO HIDROGRÁFICA EM PORTUGAL.....	54
<b>4 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE PORTUGAL .....</b>	<b>57</b>
4.1 IMPORTÂNCIA NO PANORAMA NACIONAL .....	57
4.2 SISTEMAS AQUÍFEROS E MASSAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	60
4.2.1 Sistemas aquíferos .....	60
4.2.2 Massas de águas subterrâneas .....	64
4.3 QUALIDADE NATURAL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	66
4.4 PRINCIPAIS PROBLEMAS DE POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	68
<b>5 CONTROLO DA CONTAMINAÇÃO DIFUSA DE ORIGEM AGRÍCOLA .....</b>	<b>69</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	69

5.2	SITUAÇÃO GERAL DA AGRICULTURA EM PORTUGAL .....	70
5.3	CONTAMINAÇÃO AGRÍCOLA E SEUS POTENCIAIS EFEITOS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	73
5.3.1	Origens da contaminação .....	73
5.3.2	Principais contaminantes .....	76
5.3.3	Mobilidade no meio subterrâneo .....	76
5.3.3.1	Aspectos gerais .....	76
5.3.3.2	Nutrientes .....	77
5.3.3.3	Fósforo .....	79
5.3.3.4	Organismos patogénicos .....	80
5.3.3.5	Sólidos em suspensão ou sedimentos .....	81
5.3.3.6	Pesticidas .....	81
5.3.4	Consequências da contaminação agrícola .....	82
5.4	CARACTERIZAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DIFUSA EM PORTUGAL E DAS ZONAS VULNERÁVEIS .....	84
5.5	MEDIDAS DE MINIMIZAÇÃO E CONTROLO DA CONTAMINAÇÃO .....	89
5.6	PRINCIPAIS CONCLUSÕES DE PROJECTOS NESTE DOMÍNIO .....	92
5.7	NECESSIDADES DE INVESTIGAÇÃO .....	98
<b>6</b>	<b>PREVENÇÃO DOS EFEITOS DA CONTAMINAÇÃO PROVENIENTE DE ESTRADAS E DE AEROPORTOS .....</b>	<b>101</b>
6.1	INTRODUÇÃO .....	101
6.2	REDE VIÁRIA E AEROPORTUÁRIA EM 2008 E PERSPECTIVAS FUTURAS .....	102
6.3	CONTAMINAÇÃO E SEUS POTENCIAIS EFEITOS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	106
6.3.1	Tipo de contaminantes rodoviários e sua origem .....	106
6.3.2	Tipo de contaminantes aeroportuários e sua origem .....	112
6.3.3	Potenciais efeitos na qualidade das águas subterrâneas .....	118
6.3.3.1	Aplicação da metodologia DPSIR à contaminação de estradas .....	118
6.3.3.2	Factores físicos que condicionam o transporte de contaminantes .....	121
6.3.3.3	Factores químicos que condicionam o transporte de contaminantes .....	122
6.4	MEDIDAS DE MINIMIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DA SUA EFICÁCIA .....	126
6.4.1	Conceptualização .....	126
6.4.1.1	Introdução .....	126
6.4.1.2	Metodologia de abordagem para a prevenção e a mitigação da contaminação .....	127
6.4.1.3	Medidas de minimização da contaminação das águas de escorrência .....	131
6.4.1.4	Importância das alterações climáticas .....	132
6.4.2	Avaliação da eficácia de medidas de minimização implementadas em Portugal .....	132
6.5	PRINCIPAIS CONCLUSÕES DE PROJECTOS NESTE DOMÍNIO .....	137
6.5.1	Estradas .....	137
6.5.2	Aerportos .....	143
6.6	NECESSIDADES DE INVESTIGAÇÃO .....	145
<b>7</b>	<b>MINIMIZAÇÃO DO IMPACTE DE LIXEIRAS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....</b>	<b>147</b>
7.1	INTRODUÇÃO .....	147
7.2	SITUAÇÃO EM PORTUGAL EM 2007 .....	149
7.3	CONTAMINAÇÃO PROVENIENTE DE LIXEIRAS E SEUS POTENCIAIS EFEITOS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	153
7.3.1	Caracterização geral dos RSU em Portugal no final do século .....	153
7.3.2	Principais contaminantes .....	154
7.4	PRINCIPAIS CONCLUSÕES DE PROJECTOS NESTE DOMÍNIO .....	159
7.5	NECESSIDADES DE INVESTIGAÇÃO .....	163
<b>8</b>	<b>MINIMIZAÇÃO DO EFEITO DE CATÁSTROFES NATURAIS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: FOGOS FLORESTAIS .....</b>	<b>165</b>
8.1	INTRODUÇÃO .....	165
8.2	SITUAÇÃO EM 2008 .....	166
8.3	POLUIÇÃO E POTENCIAIS EFEITOS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	171
8.3.1	Considerações gerais .....	171
8.3.2	Aspectos físicos .....	171
8.3.3	Aspectos químicos .....	175
8.3.3.1	Alterações gerais nas cinzas .....	175
8.3.3.2	Alterações gerais nos solos .....	176



8.3.3.3	Principais alterações de parâmetros físico-químicos .....	178
8.4	PRINCIPAIS CONCLUSÕES DE PROJECTOS NESTE DOMÍNIO .....	193
8.5	NECESSIDADES DE INVESTIGAÇÃO .....	199
<b>9</b>	<b>ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E A QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....</b>	<b>203</b>
9.1	INTRODUÇÃO .....	203
9.2	ESTADO DA ARTE SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS .....	204
9.2.1	Síntese do estado do conhecimento global .....	204
9.2.2	Síntese da informação para Portugal.....	210
9.3	IMPACTES DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	214
9.4	PRINCIPAIS CONCLUSÕES DE PROJECTOS NESTE DOMÍNIO .....	218
9.5	NECESSIDADES DE INVESTIGAÇÃO .....	228
<b>10</b>	<b>PROGRAMA DE ESTUDOS .....</b>	<b>231</b>
10.1	INTRODUÇÃO .....	231
10.2	CONCEPÇÃO DO PROGRAMA DE ESTUDOS .....	236
10.3	ESTIMATIVA DE CUSTOS .....	238
10.4	SUSTAINABLE RURAL LAND USE PLANNING AND MANAGEMENT AT BASIN SCALE: TOWARDS WATER PROTECTION.....	240
10.4.1	Enquadramento e justificação.....	240
10.4.2	Objectivos .....	242
10.4.3	Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver.....	242
10.4.4	Planeamento dos meios humanos necessários.....	245
10.4.5	Benefícios esperados.....	245
10.5	SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DO USO DE ÁGUAS RESIDUAIS PARA REGA DE CAMPOS DE GOLFE .....	247
10.5.1	Enquadramento e justificação.....	247
10.5.2	Objectivos .....	248
10.5.3	Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver.....	249
10.5.4	Planeamento dos meios humanos necessários.....	251
10.5.5	Benefícios esperados.....	252
10.6	AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E DE SOLOS EM ÁREAS ENVOLVENTES DE AEROPORTOS .....	253
10.6.1	Enquadramento e justificação.....	253
10.6.2	Objectivos .....	254
10.6.3	Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver.....	255
10.6.4	Planeamento dos meios humanos necessários.....	257
10.6.5	Benefícios esperados.....	257
10.7	IDENTIFICATION AND PROTECTION OF WATER BODIES SENSITIVE TO POLLUTION FROM ROADS .....	258
10.7.1	Enquadramento e justificação.....	258
10.7.2	Objectivos .....	259
10.7.3	Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver.....	259
10.7.4	Planeamento dos meios humanos necessários.....	262
10.7.5	Benefícios esperados.....	262
10.8	MINIMIZAÇÃO DO IMPACTE DE LIXEIRAS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	264
10.8.1	Enquadramento e justificação.....	264
10.8.2	Objectivos .....	265
10.8.3	Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver.....	265
10.8.4	Planeamento dos meios humanos necessários.....	268
10.8.5	Benefícios esperados.....	268
10.9	MINIMIZAÇÃO DO EFEITO DE CATÁSTROFES NATURAIS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: FOGOS FLORESTAIS .....	269
10.9.1	Enquadramento e justificação.....	269
10.9.2	Objectivos .....	271
10.9.3	Metodologia proposta – linhas-mestras a desenvolver.....	271
10.9.4	Planeamento dos meios humanos necessários.....	274
10.9.5	Benefícios esperados.....	274
10.10	METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DOS IMPACTES DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS À POLUIÇÃO E NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. ANÁLISE DE ALTERAÇÕES DE QUALIDADE NAS SÉRIES HISTÓRICAS DE ANOS HÚMIDOS E SECOS.....	276
10.10.1	Enquadramento e justificação .....	276
10.10.2	Objectivos.....	277
10.10.3	Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver.....	277
10.10.4	Planeamento dos meios humanos necessários.....	279

10.10.5	Benefícios esperados .....	279
10.11	INTEGRATED MANAGEMENT OF SURFACE AND GROUNDWATER AS A STRATEGIC RESPONSE TO CLIMATE CHANGE IMPACTS ADAPTATION IN A LONG-TERM PERSPECTIVE .....	280
10.11.1	Enquadramento e justificação .....	280
10.11.2	Objectivos .....	281
10.11.3	Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver .....	282
10.11.4	Planeamento dos meios humanos necessários .....	284
10.11.5	Benefícios esperados .....	285
<b>PARTE B - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO .....</b>		<b>287</b>
<b>11</b>	<b>PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO .....</b>	<b>287</b>
11.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	287
11.2	MESTRADO 1 - SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DO USO DE ÁGUAS RESIDUAIS PARA REGA DE CAMPOS DE GOLFE, À LUZ DAS EXIGÊNCIAS DA DIRECTIVA-QUADRO PARA A QUALIDADE DA ÁGUA .....	291
11.2.1	Objectivos .....	291
11.2.2	Linhas-mestras a desenvolver e cronograma .....	291
11.2.3	Custos .....	293
11.3	MESTRADO 2 - IDENTIFICAÇÃO E PROTECÇÃO DE MASSAS DE ÁGUA SENSÍVEIS À POLUIÇÃO DE ESTRADAS .....	294
11.3.1	Objectivos .....	294
11.3.2	Linhas-mestras a desenvolver e cronograma .....	294
11.3.3	Custos .....	296
11.4	MESTRADO 3 - CARACTERIZAÇÃO DO IMPACTE DE LIXEIRAS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL. ANÁLISE DE MEDIDAS MITIGADORAS DA CONTAMINAÇÃO .....	297
11.4.1	Objectivos .....	297
11.4.2	Linhas-mestras a desenvolver e cronograma .....	297
11.4.3	Custos .....	299
11.5	MESTRADO 4 - ENSAIOS LABORATORIAIS DE PEQUENA E MÉDIA ESCALA PARA QUANTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS. APLICAÇÃO EM ENSAIOS EM COLUNAS DE SOLO E NO AQUÍFERO ARTIFICIAL DO NAS .....	300
11.5.1	Objectivos .....	300
11.5.2	Linhas-mestras a desenvolver e cronograma .....	301
11.5.3	Custos .....	303
11.6	DOUTORAMENTO 1 - METODOLOGIAS DE ANÁLISE DO RISCO EM PROBLEMAS DE CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 304 .....	304
11.6.1	Objectivos .....	304
11.6.2	Linhas-mestras a desenvolver e cronograma .....	304
11.6.3	Custos .....	306
11.7	DOUTORAMENTO 2 - MEDIDAS DE MITIGAÇÃO E DE ADAPTAÇÃO COMO RESPOSTA AOS IMPACTES DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS .....	307
11.7.1	Objectivos .....	307
11.7.2	Linhas-mestras a desenvolver e cronograma .....	307
11.7.3	Custos .....	310
11.8	DOUTORAMENTO 3 - MODELAÇÃO NUMÉRICA DO IMPACTE DAS PRESSÕES, AO NÍVEL DA BACIA HIDROGRÁFICA, NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	311
11.8.1	Objectivos .....	311
11.8.2	Linhas-mestras a desenvolver e cronograma .....	311
11.8.3	Custos .....	313
11.9	DOUTORAMENTO 4 - DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE BASES DE CONHECIMENTO E SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO EM ESTUDOS DE QUALIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	314
11.9.1	Objectivos .....	314
11.9.2	Linhas-mestras a desenvolver e cronograma .....	314
11.9.3	Custos .....	316
<b>12</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>317</b>
12.1	SÍNTESE DOS OBJECTIVOS E DOS PROGRAMAS .....	317
12.2	BENEFÍCIOS A ALCANÇAR .....	319
12.3	EXEQUIBILIDADE .....	323
12.3.1	Recursos humanos .....	323
12.3.2	Recursos financeiros .....	323
12.4	EPÍLOGO .....	324

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Fig. 1 - Disponibilidade de água a longo prazo, por bacia hidrográfica (WWDR 2, 2006).....	3
Fig. 2 - Esquemática do enquadramento global da legislação sobre águas subterrâneas.....	16
Fig. 3 - Representação esquemática do ciclo hidrológico (extraído de Lobo Ferreira <i>et al.</i> , 2008).....	28
Fig. 4 - Representação esquemática da descarga de águas subterrâneas para um rio de que é afluente .....	29
Fig. 5 - Relação entre textura e porosidade (Meinzer, 1923 in Freeze e Cherry, 1979).....	30
Fig. 6 - Diagrama de Piper com as águas minerais engarrafadas da Europa e sua relação com o tipo de rocha de onde foram extraídas (Zuurdeeg e Van der Weiden, 1985, in Bruno, 1997).....	35
Fig. 7 - Representação esquemática dos processos de atenuação da poluição em águas subterrâneas (WHO, 1987, in Leitão, 1997).....	42
Fig. 8 - Estrutura conceptual do modelo DPSIR.....	45
Fig. 9 - Datação da água ao longo de uma linha de fluxo no aquífero e os traçadores ambientais mais comuns utilizados na datação de águas subterrâneas (Kirsch <i>et al.</i> , 2006).....	51
Fig. 10 - Delimitação das Regiões Hidrográficas de Portugal Continental (Decreto-Lei n.º 347/2007, de 19 de Outubro).....	55
Fig. 11 - População servida por abastecimento de água, por tipo de origem de água (extraído de Campanha INSAAR 2005, cf. INAG, 2007).....	58
Fig. 12 - Localização geográfica das captações de águas subterrâneas (extraído de Campanha INSAAR 2005, cf. INAG, 2007).....	59
Fig. 13 - Sistemas aquíferos de Portugal Continental.....	61
Fig. 14 - Delimitação das massas de água subterrânea em Portugal Continental (cf. <a href="http://snirh.pt/snirh/atlas/mapasweb/pt/aa29.png">http://snirh.pt/snirh/atlas/mapasweb/pt/aa29.png</a> ).....	65
Fig. 15 - Distribuição das massas de águas subterrâneas por região hidrográfica (INAG, 2005).....	65
Fig. 16 - Repartição dos tipos de fácies hidroquímica dos sistemas aquíferos de Portugal Continental (extraído de Guerreiro e Pereira, 2002).....	66
Fig. 17 - Sistemas naturais e agro-florestais em Portugal Continental (extraído de PNPOT, 2006).....	71
Fig. 18 - Distribuição das culturas agrícolas em Portugal (extraído de PDR 2007-2013).....	72
Fig. 19 - Carga de azoto utilizada em fertilizantes (kg/ha) em diversos países da Europa (extraída de Eurostat, in Vall e Vidal, 1999).....	75
Fig. 20 - Ciclo do azoto no meio subterrâneo (adaptado de Freeze e Cherry, 1979, in Leitão, 1997) ...	78
Fig. 21 - Redução relativa da infiltração por efeito conjunto da salinidade e de alcalinização da água de rega (modificado de Ayers e Westcot, 1987).....	84
Fig. 22 - Mapa de Portugal Continental para a carga poluente de origem difusa (PNA, 2001).....	86
Fig. 23 - Mapa dos sistemas aquíferos e formações sedimentares identificados como estando poluídos (cf. <a href="http://www.idrha.min-agricultura.pt/hidrologia/aquiferos/index.htm#">http://www.idrha.min-agricultura.pt/hidrologia/aquiferos/index.htm#</a> ).....	88
Fig. 24 - Mapa das oito zonas vulneráveis no Continente (cf. <a href="http://www.idrha.min-agricultura.pt/hidrologia/aquiferos/index.htm#">http://www.idrha.min-agricultura.pt/hidrologia/aquiferos/index.htm#</a> ).....	88

Fig. 25 - Mapa dos sistemas aquíferos definidos como potenciais zonas de risco e susceptíveis de se identificarem como zonas vulneráveis (cf. <a href="http://www.idrha.min-agricultura.pt/hidrologia/aquiferos/index.htm#">http://www.idrha.min-agricultura.pt/hidrologia/aquiferos/index.htm#</a> ) .....	89
Fig. 26 - PNR 2000, Estradas de Portugal, S.A. ....	103
Fig. 27 - Mapa dos aeroportos nacionais e internacionais de Portugal Continental (enviada pelo Centro de Documentação e Informação do Instituto Nacional de Aviação Civil) .....	104
Fig. 28 - Mapa dos aeroportos nacionais e internacionais de Portugal Insular (enviada pelo Centro de Documentação e Informação do Instituto Nacional de Aviação Civil) .....	105
Fig. 29 - Aeroportos internacionais de Portugal ( <a href="http://www.icep.pt/portugal/portugal.asp">http://www.icep.pt/portugal/portugal.asp</a> ) .....	105
Fig. 30 - Aplicação do modelo conceptual DPSIR à contaminação causada por estradas (Leitão <i>et al.</i> , 2004).....	119
Fig. 31 - Bacia de tratamento à saída de uma zona cársica da Eslovénia (cortesia de M. Brenčič) ....	128
Fig. 32 - Concentração em hidrocarbonetos totais em amostras de águas subterrâneas monitorizados recolhidas junto à A2, S. Bartolomeu de Messines – VLA (Leitão <i>et al.</i> , 2008) .....	135
Fig. 33 - Concentração em metais pesados nos solos junto à A6, nó de Borba (Leitão <i>et al.</i> , 2005) ..	136
Fig. 34 - Esquema geral do plano de monitorização na EN10, Recta do Cabo (Diamantino, 2002) ....	138
Fig. 35 - Localização do destino final dos resíduos sólidos em Portugal no final dos anos 90 (PERSU, 1997).....	150
Fig. 36 - Evolução do número de lixeiras entre 1996 e 2003 (PERSU II, 2007).....	150
Fig. 37 - Comparação das metas definidas no PERSU I para 2005 e situação verificada nesse mesmo ano (extraído de PERSU II) .....	150
Fig. 38 - Destino final de RSU em Portugal Continental entre 1995 e 2004 (extraído de Pires, 2006) 152	
Fig. 39 - Composição física média dos RSU em Portugal – 1993 (Vieira, 1995, <i>in</i> PERSU, 1997) ....	154
Fig. 40 - Esquema das conversões anaeróbias de depósitos de RSU (extraído de Russo, 2005) .....	157
Fig. 41 - Mapas de áreas aridas entre 1990-1996 .....	168
Fig. 42 - Mapas de áreas aridas entre 1997-2004 .....	168
Fig. 43 - Susceptibilidade à desertificação (extraído de PDR 2007-2013) .....	169
Fig. 44 - Carta de Risco de Incêndio Florestal em 2008 (extraída de <a href="http://mapas.igeo.pt/">http://mapas.igeo.pt/</a> ).....	170
Fig. 45 - Valores de concentração em sódio nos quatro locais de estudo (Laranjeira e Leitão, 2008) 188	
Fig. 46 - Valores de concentração em fosfatos nos quatro locais de estudo (Laranjeira e Leitão, 2008) .....	190
Fig. 47 - Precipitação anual média por região hidrográfica (extraído de PNPOT, 2006).....	204
Fig. 48 - Concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e ácido nítrico nos últimos 10 000 anos (gráficos maiores) e desde 1750 (gráficos ampliados). As medidas provêm de amostragem em sondagens no gelo (cores diferentes são relativas a estudos diferentes) e amostras da atmosfera (linhas encarnadas) (extraído de IPCC, 2007) .....	206
Fig. 49 - Observações registadas na (a) temperatura média da superfície, (b) média global do nível médio do mar e (c) superfície nevada no hemisfério norte para os meses Março-Abril (extraído de IPCC, 2007) .....	207
Fig. 50 - Mudança relativa nos padrões de precipitação com base em estimativas efectuadas para o período 2090-2099, relativamente aos valores para o período 1980-1999 (extraído de IPCC, 2007).....	208

Fig. 51 - Evolução da anomalia da temperatura média anual na Península Ibérica para diversos modelos globais (GCMs), calculada como a diferença entre as simulações com o aumento de CO <sub>2</sub> e a média do período de controlo (extraído de SIAM II).....	212
Fig. 52 - Séries temporais de precipitação anual nos três pontos, Norte, Centro e Sul da zona Oeste da Península Ibérica para o modelo HadCM3 forçado com os cenários SRES-A1FI, A2, B1, B2 (extraído de SIAM II).....	213
Fig. 53 - Síntese dos principais efeitos das alterações climáticas e seus possíveis impactes nos recursos hídricos.....	215
Fig. 54 - Representação esquemática das forças motrizes e pressões analisadas (a vermelho) e das ferramentas horizontais a utilizar nos Programas de Estudos e de Pós-graduação (a verde)	233
Fig. 55 - Organigrama dos Programas de Estudos propostos (nota: a sublinhado estão as letras que deram origem ao acrónimo e a <b>negrito</b> está a pressão analisada no programa) .....	237
Fig. 56 - Representação esquemática das forças motrizes e pressões analisadas e das ferramentas horizontais a utilizar nos Programas de Estudos e de Pós-graduação e sua ligação a teses de doutoramento desenvolvidas no LNEC (estrelas cinza) e a novas áreas a desenvolver com mestrados e doutoramentos (estrelas laranja).....	289
Fig. 57 - Equipamento de ensaio em coluna do NAS para determinação de parâmetros de meios porosos .....	300
Fig. 58 - Aquífero artificial do NAS para ensaios em meios porosos (4 x 2 x 1,5 m <sup>3</sup> ) .....	300



---

## ÍNDICE DE QUADROS

---

Quadro 1 - Definições do Bom estado das águas subterrâneas, do ponto de vista quantitativo e químico, segundo a DQA (cf. Directiva 2000/60/EC) .....	13
Quadro 2 - Substâncias identificadas na Directiva-Quadro da Água e na Directiva das Águas Subterrâneas (adaptado de Hookey <i>et al.</i> , 2006) .....	14
Quadro 3 - Lista dos principais diplomas legais de protecção das águas subterrâneas .....	17
Quadro 4 - Porosidade e condutividade hidráulica para diferentes formações geológicas (adaptado de Freeze e Cherry, 1979 e Boulding, 1995) .....	31
Quadro 5 - Concentração relativa de elementos dissolvidos nas águas subterrâneas (adaptado de Todd, 1980, in Chapman, 1996) .....	36
Quadro 6 - Súmula das características químicas das principais actividades contaminantes (adaptado e acrescentado a partir de WHO, 1987).....	40
Quadro 7 - Propriedades do aquífero e dos poluentes capazes de afectar o transporte e comportamento dos poluentes no subsolo (adaptado de Knox <i>et al.</i> , 1993, in Leitão, 1997) ...	41
Quadro 8 - Indicadores de sustentabilidade de águas subterrâneas propostos pelo WWDR 2 (cf. Vrba e Lipponen, 2007) .....	48
Quadro 9 - Origem da água consumida em Portugal.....	59
Quadro 10 - Valores da mediana das produtividades dos sistemas aquíferos de Portugal Continental (extraído de Almeida <i>et al.</i> , 2000) .....	62
Quadro 11 - Resumo das características principais naturais da qualidade das águas subterrâneas em Portugal (adaptado de Meus <i>et al.</i> , 2006) .....	67
Quadro 12 - Quantidades de nutrientes principais removidos do solo por algumas culturas (Soveral Dias, 1994).....	74
Quadro 13 - Indicação dos potenciais contaminantes de estradas em diferentes fases (DMRB, 2006) .....	106
Quadro 14 - Principais contaminantes presentes no ambiente rodoviário e suas origens.....	107
Quadro 15 - Valores exemplificativos da qualidade das águas de escorrência obtidas em diversos estudos (Folkesson <i>et al.</i> , 2008).....	110
Quadro 16 - Contaminantes gerados em operações efectuadas em áreas de estacionamento e de manutenção (Le Dean <i>et al.</i> , 1995).....	114
Quadro 17 - Valores médios de concentração das águas de escorrência de aeroportos, obtidos em amostragem de aeroportos de França (Legret <i>et al.</i> , 1999).....	116
Quadro 18 - Classificação de métodos de minimização da contaminação rodoviária (Brenčič <i>et al.</i> , 2008).....	127
Quadro 19 - Informação existente sobre a monitorização de recursos hídricos para análise de contaminação de estradas (Leitão <i>et al.</i> , 2008) .....	134

Quadro 20 - Cargas de contaminação anual por hectare impermeabilizado (Legret e Thirionet, 1999)	145
Quadro 21 - Estimativa de produção de RSU em Portugal no final do século passado (adaptado de PERSU, 1997)	153
Quadro 22 - Concentrações típicas de lixiviado de RSU	158
Quadro 23 - Reacção térmica do solo ao aumento da temperatura (Moreno, 2004, in Lobo Ferreira <i>et al.</i> , 2006)	173
Quadro 24 - Síntese da informação sobre qualidade dos solos e das águas em áreas áridas	180
Quadro 25 - Áreas de interesse do NAS no âmbito do 7.º Programa-Quadro da UE, Tema 6 – "Ambiente (incluindo alterações climáticas)" e sua ligação aos Programas de Estudos propostos	236
Quadro 26 - Listagem dos Programas de Estudos propostos e principais características perspectivadas	239
Quadro 35 - Lista dos Programas de Estudos e sua inter-relação com os Programas de Pós-graduação (n.º de horas de mestrado e de doutoramento em cada Programa)	290



---

## PREFÁCIO

---

Como é do conhecimento geral, a "Directiva que Estabelece um Quadro de Acção Comunitária no Domínio da Política da Água" (DQA) veio definir objectivos específicos e muito exigentes para a gestão dos recursos hídricos: um bom estado das águas em todo o espaço da União Europeia até 2015! No que se refere às águas subterrâneas, a DQA é complementada com uma directiva específica, a Directiva das Águas Subterrâneas, que determina com maior pormenor como alcançar uma boa qualidade química e quantitativa de todas as águas subterrâneas nesse horizonte temporal. Esta legislação, e os correspondentes objectivos e calendários de execução, foram transpostos para o direito português pela Lei da Água, Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro, complementada pelo Decreto-Lei n.º 77/2006, de 30 de Março, para o caso da Directiva-Quadro, e pelo Decreto-Lei n.º 208/2008, de 28 de Outubro, para o caso da Directiva das Águas Subterrâneas.

São, assim, muito ambiciosas e exigentes as tarefas com que Portugal, e os restantes 26 Estados-Membros, se comprometeram. A sua realização só é possível se for mobilizado o melhor conhecimento, se forem utilizadas as melhores tecnologias e se forem desenvolvidas as melhores capacidades científicas, no quadro de uma gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos.

É neste contexto que o presente trabalho se inscreve, proporcionando um contributo muito importante para um melhor conhecimento da problemática dos recursos hídricos subterrâneos e, sobretudo, para o desenvolvimento de abordagens e metodologias que permitem fazer face às principais ameaças que impendem sobre esses recursos. Para além de uma visão de conjunto, bem estruturada e formulada com grande clareza, da problemática das águas subterrâneas e dos requisitos a que deve obedecer a sua gestão integrada e sustentável, a autora analisa detalhadamente aqueles que são seguramente, no momento presente, alguns dos maiores desafios em Portugal: a contaminação difusa de origem agrícola, os impactes de estradas e aeroportos, a poluição causada por lixeiras, o efeito de catástrofes naturais como os incêndios florestais e, finalmente, os impactes das alterações climáticas na qualidade das águas subterrâneas.

Não poderiam ser mais relevantes os temas escolhidos, tanto pela gravidade de que se revestem, como pela necessidade de mobilizar o melhor conhecimento técnico-científico para lhes dar solução adequada. A resolução ou mitigação desses problemas constitui um contributo essencial para promover uma gestão integrada e sustentável das águas subterrâneas em Portugal e em todo o espaço comunitário e, dessa forma, alcançar uma gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos, de acordo com o desígnio estabelecido pela Directiva-Quadro.

É sempre estimulante quando um trabalho de elevado nível científico não se limita a caracterizar problemas, por muito importantes que sejam, mas antes se preocupa, como acontece com a presente obra, em contribuir para identificar as abordagens e as metodologias que devem ser adoptadas para que a sua resolução possa ser alcançada com êxito. Neste caso, as propostas de investigação são ainda complementadas com um programa de formação pós-graduada em que se destaca um conjunto de temas de dissertação de mestrado e doutoramento que asseguram solidez e sustentabilidade às actividades de investigação propostas.

É também estimulante constatar a grande oportunidade de que se reveste a publicação deste trabalho. As ARH estão a iniciar a preparação de uma segunda geração de Planos de Gestão de Região Hidrográfica, agora em conformidade com as exigências da DQA, e o INAG está a iniciar o processo de elaboração de um novo Plano Nacional da Água. A identificação e análise de temas especialmente relevantes, e a formulação das necessidades de investigação que esses temas suscitam, devem ser vistas como contributos para esses exercícios de planeamento às escalas nacional e regional e devem ser de alguma forma assimiladas como parte integrante dos planos em preparação. Com efeito, as componentes científicas e tecnológicas são dimensões incontornáveis de uma abordagem moderna ao planeamento dos recursos hídricos e, nessa medida, o presente trabalho vem dar um contributo muito actual e com especial significado.

Um documento desta índole deve-se, em primeiro lugar e acima de tudo, ao mérito da sua autora. Mas esse mérito só se pode afirmar no quadro de uma equipa e de uma instituição dotadas com um bom conhecimento do “país real”, cientes das melhores abordagens para fazer face aos problemas e apetrechadas com os melhores contributos científicos desta área de conhecimento. É seguramente o caso do dinâmico Núcleo de Águas Subterrâneas, integrado no Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Assim, cabe felicitar em primeiro lugar a autora, mas cabe também felicitar a instituição pelo trabalho desenvolvido e pelos horizontes abertos e postos à disposição de toda a comunidade técnica e científica. Este é um contributo de grande significado para o desenvolvimento do País, desenvolvimento esse que depende, e muito, da qualidade da sua investigação e de uma boa gestão dos seus recursos.

Lisboa, Março de 2010  
Francisco Nunes Correia

---

## AGRADECIMENTOS

---

Um trabalho desta natureza só pode germinar se inserido numa estratégia de actuação de um grupo mais lato de pessoas, neste caso do Núcleo de Águas Subterrâneas, na medida em que o seu contributo incide em delinear novas áreas de investigação que vão ao encontro das melhores respostas às exigências impostas pelo estilo de vida do Homem e suas consequências em termos de pressões, no ambiente e nos recursos.

Este exercício de análise introspectiva do passado para projecção do rumo do presente e do futuro implica o amadurecimento de muitas das matérias que vêm sendo desenvolvidas no NAS por todos os seus colaboradores ao longo dos últimos 18 anos, revertidas nomeadamente nas dissertações de mestrado, teses de doutoramento e programa de habilitação que aí foram desenvolvidos. São tantos os trabalhos e as pessoas neles envolvidas (mais de 30 colaboradores) que me dispense de os enumerar. Agradeço a todos os que fizeram ou fazem parte do NAS por tudo o que com eles aprendi, pela troca de experiências e pela cumplicidade de análise de tantos assuntos que nos foram passando pelas mãos. Faço-o em nome do seu chefe Doutor João Paulo Lobo Ferreira, a quem agradeço reconhecidamente por tudo o que me ensinou e pelo apoio directo e sugestões que deu a este trabalho.

Agradeço o suporte específico da Eng.<sup>a</sup> Patrícia Terceiro na elaboração do Capítulo 8 e na pesquisa de alguns temas para os Programas de Pós-graduação, da Eng.<sup>a</sup> Isabel Laranjeira na preparação da Secção 3.7.2, das Sr.<sup>as</sup> D. Marta Rodrigues e Isabel Quitéria no apoio à preparação das publicações a apresentar a este concurso e ao Doutor Ian Dodkins pela revisão do resumo em inglês.

Gostaria de agradecer ao LNEC, na pessoa do seu actual Presidente, Eng. Carlos Matias Ramos, e da Directora do Departamento de Hidráulica e Ambiente, Eng.<sup>a</sup> Rafaela de Saldanha Matos, pelas condições que sempre me proporcionou em termos de formação, com uma procura constante pela transmissão de uma escola de saber e de trabalho de equipa, com profundidade de análise, rigor e isenção, valores porque sempre me procurei e procurarei reger.

Agradeço a todos os amigos da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos por tudo o que com eles aprendi e pela clarividência com que a abordagem da gestão holística dos recursos hídricos é vivida e transmitida.

Agradeço aos meus Pais os valores que me transmitiram, responsáveis pela minha formação pessoal.

Ao João Paulo, André e Bernardo, pela força que emerge da partilha do nosso Amor.



---

## SIMBOLOGIA

---

ARHAlg - Administração da Região Hidrográfica do Algarve  
ARHs - Administrações das Regiões Hidrográficas, I.P.  
BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières, França  
CMPV - Câmara Municipal de Praia da Vitória  
CNC / PANCD - Comissão Nacional de Coordenação do Plano de Acção Nacional de Combate à Desertificação  
COTR - Centro Operativo de Tecnologias de Regadio  
CRCIF - Carta de Risco Conjuntural de Incêndio Florestal  
CRIF - Cartografia de Risco de Incêndio Florestal  
CWRC - ChangJiang Water Resources Commission  
DAS - Directiva das Águas Subterrâneas  
DG - Departamento de Geotecnia do LNEC  
DGRF - Direcção-Geral dos Recursos Florestais  
DHA - Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC  
DPSIR - Driving Force (Força Motriz) - Pressure (Pressão) - State (Estado) - Impact (Impacte) - Response (Resposta)  
DQA - Directiva-Quadro da Água  
DT - Departamento de Transportes do LNEC  
EAN - Estação Agronómica Nacional  
EP - Estradas de Portugal, S.A.  
FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
FPG - Federação Portuguesa de Golfe  
GeoZS - Geological Survey of Slovenia, Eslovénia  
GEUS - Geological Survey of Denmark and Greenland, Dinamarca  
IC - Itinerário Complementar  
IDRHa - Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica Agrícola  
IET - Institute of Environmental Technology, Vietnam  
IGE - Instituto Geológico da Eslovénia, Eslovénia  
IMECH - Institute of Mechanics, National Center for Science and Technology, Vietnam  
INAC - Instituto Nacional de Aviação Civil, I.P.  
INAG - Instituto da Água, I.P.  
INR - Instituto Nacional dos Resíduos, I.P.  
INRGREF - Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts  
INSAAR - Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais  
Interreg IV - Programa da UE Innovation & Environment Regions of Europe Sharing Solutions  
IM - Instituto de Meteorologia  
IP - Itinerário Principal

IPPC - Directiva IPPC sobre prevenção e controlo integrados da poluição  
IRAR - Instituto Regulador de Águas e Resíduos  
ISA - Instituto Superior de Agronomia  
LA - Lei da Água  
LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, França  
NAER - Novo Aeroporto, S.A.  
NAS - Núcleo de Águas Subterrâneas do DHA do LNEC  
NGEA - Núcleo de Geologia de Engenharia e Geotecnia Ambiental do DG do LNEC  
NIVA - Norwegian Institute of Water Research, Noruega  
NRE - Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do DHA do LNEC  
PBH - Planos de Bacia Hidrográfica  
PDR - Plano Estratégico Nacional do Desenvolvimento Rural (2007-2013)  
PERSU II - Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (2007- 2016)  
PEAASAR - Plano Estratégico de Abastecimento de Águas e Saneamento de Águas Residuais  
PGBH - Planos de Gestão de Bacia Hidrográfica  
PIP - Plano de Investigação Programada quadrienal do LNEC  
PNA - Plano Nacional da Água  
PNDFCI - Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios  
PNPOT - Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território  
PNUEA - Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água  
PQ - Programa-Quadro da União Europeia  
PRN - Plano Rodoviário Nacional  
RNA - Rede Nacional de Auto-estradas  
SAU - Superfície Agrícola Útil  
SWRRC - Sustainable Water Resources Research Center Contact, Coreia  
UAlg - Universidade do Algarve  
UC - Universidade de Coimbra  
UE - União Europeia  
UG - Universidade de Gottingen, Alemanha  
UM - Universidade do Minho  
UN - Universidade de Nottingham, Reino Unido  
UPC - Universidade Politécnica da Catalunha, Espanha  
VTI - Swedish National Road and Transport Research Institute, Suécia

## PARTE A - PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

# GESTÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL

Contributos para um Bom estado em 2015

*"Se queres ir rápido, vai sozinho; se queres ir longe, junta-te a outros"*, antigo provérbio do Quênia

## 1 INTRODUÇÃO

---

### 1.1 Considerações iniciais

O Programa de Investigação que se apresenta na Parte A deste trabalho insere-se no Grupo de Áreas Científicas de "Hidráulica e Ambiente", na Área Científica designada por "Engenharia de Recursos Hídricos e Obras Hidráulicas".

Destina-se, em conjunto com o Programa de Pós-graduação que constitui a Parte B deste documento, à prestação de provas públicas no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, para obtenção do título de *Habilitado para o exercício de funções de coordenação de investigação científica*, nos termos do disposto no Decreto-Lei n.º 124/99, de 20 de Abril, que regula o Estatuto da Carreira de Investigação Científica.

O presente Programa de Investigação inclui, de acordo com o disposto no n.º 3 do art. 30.º do referido Decreto-Lei, uma síntese dos conhecimentos existentes sobre o tema abordado, uma apresentação crítica dos problemas já tratados e dos problemas em aberto, bem como um Programa de Estudos relativo a alguns desses problemas, e propõe uma metodologia, os meios necessários, os objectivos a atingir e os benefícios esperados da sua realização.

A preservação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos foi a temática seleccionada para este Programa de Investigação e de Pós-graduação intitulado **Gestão integrada e sustentável da qualidade das águas subterrâneas em Portugal: contributos para um Bom estado em 2015**.

Nas secções seguintes apresenta-se o contexto actual global dos grandes desafios da gestão integrada e sustentável da água no presente século e as razões subjacentes à selecção do tema para este Programa, finalizando-se com a apresentação dos objectivos e da estrutura do mesmo.

## **1.2 Os grandes desafios da gestão integrada e utilização sustentável da água no século XXI**

A água é um recurso indispensável para se garantir a sustentabilidade e a preservação dos sistemas naturais e da vida humana em sociedade (PNPOT, 2006). Para o Homem, a água não só é indispensável à vida mas também apresenta crucial importância para o desenvolvimento das suas actividades, na indústria, na agricultura e nas actividades recreativas.

O paradigma do desenvolvimento sustentável para o século XXI assenta na disponibilidade de água doce potável. Esta deve ser gerida de forma apropriada, *i.e.* baseada nas melhores opções técnicas disponíveis e nos conhecimentos científicos apropriadamente aplicados no contexto das necessidades socioeconómicas da população. A manutenção da quantidade e da qualidade dos recursos hídricos é o aspecto fundamental da gestão da água.

O recurso a gerir é escasso! Efectivamente, apenas 3% da água do Planeta é doce, encontrando-se quase 70% nas calotes polares e nos glaciares, cerca de 30% são águas subterrâneas e o restante valor, inferior a 1%, nos rios e nos lagos. Se não se tiver em conta a água das calotes polares e dos glaciares, então as águas subterrâneas constituem mais de 95% do total da água doce, mesmo se se considerarem apenas as águas acessíveis, estimadas por Lvovitch (1972, in Chapman, 1996) em  $4 \times 10^6$  km<sup>3</sup>.

Acresce que a água doce líquida está muito irregularmente repartida nas diversas regiões do mundo (cf. Fig. 1) e apresenta grandes oscilações sazonais e interanuais. Também o acesso a este recurso varia entre a acentuada escassez, geralmente verificada nas áreas economicamente menos favorecidas, com valores de cerca de 100 m<sup>3</sup>/hab/ano, ao desperdício de água com valores que chegam a atingir os 10 000 m<sup>3</sup>/hab/ano.



As Nações Unidas apresentam a projecção de que 1/3 da superfície terrestre está ameaçada pela desertificação, facto que levou à declaração do ano 2006 como o Ano Internacional dos Desertos e Desertificação, e a estimativa de que em 2025, 2 em cada 3 pessoas poderão vir a sofrer de stress hídrico se se mantiverem os actuais padrões de consumo, já contando com um elevado crescimento exponencial da população à escala planetária. A este aspecto da disponibilidade de água junta-se as preocupações relativas à deterioração da sua qualidade que têm conduzido a um enorme esforço global de mudança de atitudes, de mentalidades e de prioridades face à gestão dos recursos hídricos. Não obstante, a manutenção deste empenhamento não basta para cumprir os diversos compromissos internacionais assumidos em termos do acesso à água e saneamento, designadamente na Declaração do Milénio das Nações Unidas, e nas cimeiras mundiais do Rio, de Joanesburgo e de Quioto.

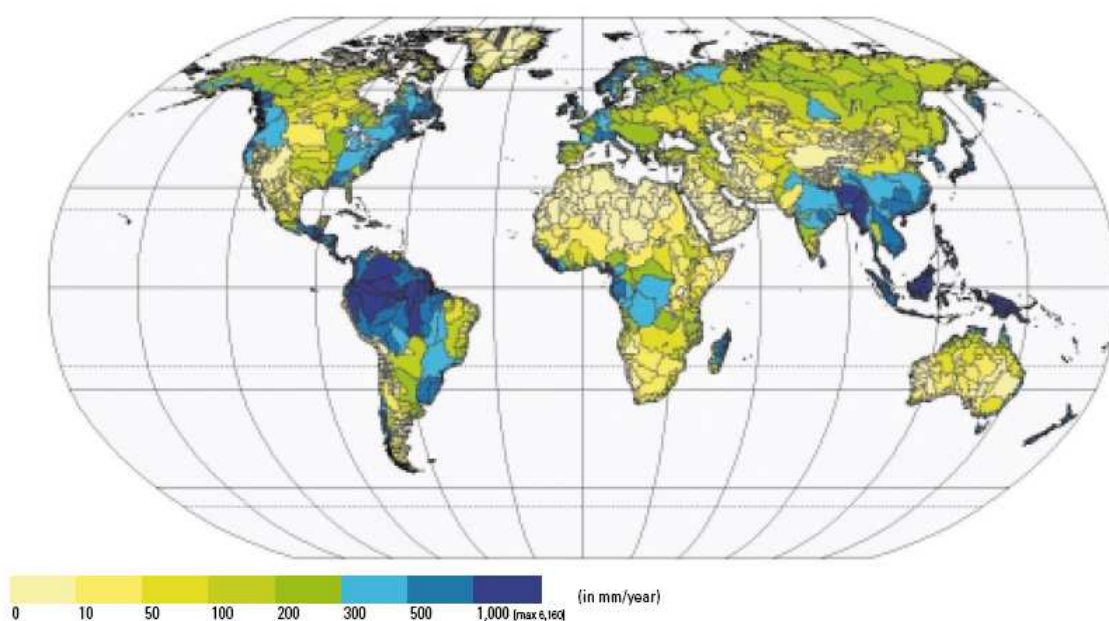


Fig. 1 - Disponibilidade de água a longo prazo, por bacia hidrográfica (WWDR 2, 2006)

Portugal Continental não é excepção no que diz respeito à variabilidade de distribuição dos seus recursos hídricos no território, com zonas com valores de precipitação média anual superiores a 3 000 mm na região do Minho, ao mesmo tempo que a região do Alentejo apresenta valores equivalentes de cerca de 400 mm. Por outro lado, a localização geográfica do País é favorável à ocorrência de episódios extremos, de seca e de cheias que, sendo aleatórios, são recorrentes e podem vir a ser agravados devido ao efeito de alterações climáticas.

No contexto da realidade portuguesa, e tendo em atenção os novos desafios que se colocam a Portugal no domínio dos recursos hídricos, de onde se destacam os decorrentes da Directiva-Quadro da Água (DQA), da Lei da Água, do Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (PNUEA), do Plano Estratégico de Abastecimento de Águas e Saneamento de Águas Residuais (PEAASAR) 2007/12, entre outros, é fundamental que as decisões constituam

actuações de continuidade, de carácter preventivo e estruturante, a serem tomadas de forma participada e técnica e cientificamente bem fundamentada. Espera-se que estas exigências sejam encaradas, não apenas como mais legislação que é preciso cumprir pelo mínimo, mas sim como um estímulo e um desafio de cidadania, e como instrumentos de promoção de adequadas formas de governança no domínio da Água, para uma gestão descentralizada, participativa e integrada que promova adequadas formas de governança.

Um modelo de gestão de Recursos Hídricos exige uma visão global integrada, a longo prazo, dos recursos disponíveis e das necessidades dos utilizadores (abastecimento urbano, agricultura, indústria, produção hidroeléctrica, ecossistemas aquáticos) numa transparente e solidária articulação das políticas públicas e numa clara definição das competências e coordenação de iniciativas dos vários responsáveis pela administração do território, onde se reconheçam as dimensões de natureza ambiental, ética, social e económica. Os problemas estão a tornar-se cada vez mais complexos, exigindo, para a sua resolução, conhecimentos cada vez mais específicos, bem como a eficiente integração de diversos esforços entre diferentes áreas de conhecimento.

É fundamental manter ao serviço de uma boa gestão e planeamento dos recursos hídricos a investigação e o aprofundamento do conhecimento. Há uma clara lacuna entre o diagnóstico e os planos traçados, em boa parte integrados nos planos e programas elaborados (Planos de Bacia Hidrográfica; Plano Nacional da Água; Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água), e a tomada de decisões.

O consumo total de água em Portugal é de cerca de 8 km<sup>3</sup>/ano (*i.e.* 800 m<sup>3</sup>/hab/ano), 81,7% do qual se destina à agricultura, 13,5% ao abastecimento urbano às populações e 4,8% à indústria (INSAAR 2005, cf. INAG, 2007). Esse consumo de água não é regular ao longo do ano, havendo um incremento da necessidade de água no período do Verão, altura em que se verifica maior procura de água em regiões turísticas, além de maiores necessidades para a agricultura. Nem toda esta água que é captada é efectivamente aproveitada, na medida em que há uma parcela importante associada a ineficiência de uso e a perdas.

A capacidade de armazenamento de água em albufeiras é de cerca de 12 km<sup>3</sup> (dos quais cerca de 4 km<sup>3</sup> em Alqueva), estimando-se as reservas de águas subterrâneas em cerca de 100 km<sup>3</sup>, embora nem toda esta água seja explorável, aspecto também válido para a água armazenada em albufeiras.

A gestão dos recursos hídricos em Portugal, face à irregularidade do regime de precipitação e, conseqüentemente, do regime hidrológico, impõe a regularização dos caudais e o armazenamento da água dos rios de forma a minimizar os efeitos de situações extremas, respeitando de forma cuidada o ambiente através da ponderação das conseqüências das alterações impostas ao regime hidrológico e os seus efeitos nos ecossistemas associados, entre outros aspectos. A inclusão das reservas de água subterrânea como recurso de natureza

complementar às águas de superfície é elementar para uma adequada gestão da água. As vantagens de ter reservatórios naturais já construídos pela própria natureza não necessitando de investimentos a esse nível, onde os efeitos da elevada evaporação do País são desprezáveis e em locais onde existe uma protecção natural da qualidade da água proporcionada pelas camadas de solos suprajacentes são inequívocas para a efectiva gestão e planeamento integrado dos nossos recursos hídricos.

O uso eficiente da água, contribuindo para a redução das perdas e do consumo, através de medidas de carácter preventivo e não de mitigação tendo em conta a possibilidade de melhoria do estado das infra-estruturas e a utilização de sistemas de rega mais eficientes, são outros dos aspectos a considerar.

Por outro lado, é fundamental a preservação dos recursos hídricos em termos da sua qualidade e é necessário pôr em marcha um conjunto de actuações conducentes à reabilitação dos recursos poluídos. A DQA é clara a este respeito: até 2015 teremos que ter os nossos recursos hídricos em estado de qualidade e quantidade Bom, sob pena de serem aplicadas pesadas multas diárias ao País.

Registam-se importantes problemas de contaminação de água de origem pontual e difusa, originada por más práticas de rejeição de efluentes líquidos e de resíduos sólidos procedentes da indústria, agricultura e fontes domésticas ao longo das últimas décadas. Elevados investimentos e retornos têm sido observados no âmbito das descargas de águas residuais e industriais, embora neste último campo subsistam rejeições ilegais com claros efeitos adversos para a degradação da qualidade das águas de jusante. No domínio da agricultura, como a principal actividade consumidora de água no País, a utilização de sistemas de rega mais eficientes e de práticas agrícolas compatíveis com os níveis de qualidade de jusante reveste-se de grande importância na medida em que o uso parcimonioso da água reduz, também, a possibilidade de migração de fertilizantes e de pesticidas para as águas subterrâneas. É sabido que o investimento em proteger as águas subterrâneas em vez de as reabilitar constitui uma clara economia de verbas e de futuras dificuldades.

A ameaça de contaminação de águas subterrâneas resulta de um processo natural e incessante estimulado pelo ciclo da água associado às capacidades químicas da água como um solvente universal em interacção com o meio envolvente. Esta ameaça está intimamente ligada às actividades humanas de ocupação e uso do solo.

As alterações que é necessário pôr em marcha no sentido de proteger as águas subterrâneas contra a contaminação e a deterioração, tal como preconizado na Directiva das Águas Subterrâneas, encerram, em si mesmas, grandes desafios que implicam uma mudança cultural assinalável. Talvez a questão mais complexa com que Portugal (entre outros países) se debate seja a falta de consenso e coordenação entre as diferentes entidades administrativas do nosso território no uso e gestão responsável da água.

### 1.3 Razões para a escolha do tema

No contexto dos recursos hídricos mundiais, as águas subterrâneas constituem mais de 95% das reservas de água doce no estado líquido do planeta, com os restantes 3,5% em lagos, rios, zonas húmidas e reservatórios e 1,5 % na água do solo (Freeze e Cherry, 1979). Estima-se que 1,5 mil milhões de habitantes dependam das águas subterrâneas para o seu abastecimento. As extracções anuais de águas subterrâneas estimadas por Zektser e Everett (2004, in Vrba e Lipponem, 2007) para 2004 eram de 600 a 700 km<sup>3</sup>. Nos países da União Europeia cerca de 70% da água para abastecimento público tem origem subterrânea (Vrba e Lipponem, 2007), sendo igualmente fundamental para a irrigação agrícola e para o abastecimento da indústria. O papel predominante dos recursos hídricos subterrâneos é claro e o seu uso e protecção são, por isso, de fundamental importância para a preservação da vida humana e dos ecossistemas, bem como das actividades económicas.

Em Portugal Continental estima-se que as reservas de águas subterrâneas superem largamente as reservas superficiais em albufeiras, com valores de cerca de 100 km<sup>3</sup> e de 12 km<sup>3</sup>, respectivamente. Cerca de 44% da população portuguesa do Continente é servida por águas subterrâneas, número que ascende a cerca de 93% e 99% nas Regiões Autónomas da Madeira e dos Açores, respectivamente (INAG, 2007). O volume de águas subterrâneas anualmente captado para abastecimento urbano no Continente corresponde a cerca de 37% do volume total, *i.e.* 399 hm<sup>3</sup> de 1086 hm<sup>3</sup>.

Este recurso apresenta potencialidades ímpares resultantes da sua boa distribuição espacial e da existência de importantes reservas, associadas ao facto de ser um recurso que, pela sua natureza, mostra uma grande resiliência a efeitos de flutuações climáticas sazonais e a processos de contaminação, apresentando uma forte estabilidade das reservas de água e da qualidade natural oferecida pelos processos naturais de purificação. É, por isso, um recurso muitas vezes mais económico e promissor na gestão das reservas hídricas a longo prazo, atendendo já aos efeitos das expectáveis alterações climáticas que se esperam para este século e a eventuais cenários de desastres que possam afectar outros recursos.

No âmbito do ciclo da água, as águas subterrâneas contribuem de forma importante para alimentar algumas zonas húmidas e o caudal de base dos rios ao longo de todo o ano. Consequentemente, a deterioração da qualidade das águas subterrâneas pode afectar directamente os meios hídricos e os ecossistemas associados. Por outro lado, a natureza do processo de recarga de águas subterrâneas implica que haja uma passagem à superfície e através do solo pelo que o controlo da sua qualidade está intimamente ligado ao uso e ocupação do solo e todas as actividades e pressões existente à superfície.

Ao conjunto de aspectos relativos à importância em termos quantitativos das águas

subterrâneas há que juntar a sua relevância do ponto de vista da qualidade que, à partida, apresenta características muito favoráveis dada a protecção natural que os solos suprajacentes lhes proporcionam.

Apesar das qualidades atribuídas a este recurso, a sua gestão e controlo da contaminação são geralmente relegados para segundo plano, dada a invisibilidade do recurso e o extenso período de tempo decorrido entre a sua deficiente gestão e os efeitos nefastos por ela causados. Registam-se, assim, situações de sobreexploração e conseqüente diminuição dos níveis piezométricos que conduzem a efeitos de intrusão salina em zonas costeiras, de diminuição do escoamento de base em rios ou em zonas húmidas, de secagem ou diminuição de caudal em nascentes e, por vezes, de subsidência dos solos. Por outro lado, a qualidade das águas subterrâneas também tem dado sinais de degradação com problemas de intrusão marinha em zonas costeiras e diversos problemas de contaminação pontual e difusa identificados em quase todos os países. Dada a importância da contribuição do escoamento subterrâneo para os rios, a deterioração da sua qualidade pode comprometer a qualidade dos recursos superficiais e ecossistemas associados.

A manterem-se as actuais práticas é expectável vir a registar importantes rupturas a nível social, de saúde pública, económico e ecológico. Ainda que com as alterações que se impõe, os efeitos de actividades passadas pode vir a fazer-se sentir durante gerações, comprometendo usos.

O papel das águas subterrâneas no contexto global dos recursos hídricos implica que se tenham em consideração dois aspectos de crucial importância, onde se reconhece este recurso não apenas como um reservatório de água mas também como um recurso dinâmico com importante papel na gestão dos recursos hídricos [Vrba and Lipponen, 2007, citando o International Hydrological Programme (IHP) e o World Water Assessment Programme (WWAP)]: (1) as águas subterrâneas têm que ser analisadas no contexto mais global do ciclo hidrológico e os aquíferos como uma componente hidrológica significativa e integrante das bacias hidrográficas e (2) as águas subterrâneas devem ser apreendidas no contexto mais vasto das dimensões económica, social e ecológica, em especial daquelas que estão relacionadas com o seu uso e as suas conseqüências.

A experiência mundial no passado recente sobre a reabilitação de águas subterrâneas poluídas evidencia dificuldade em remover as concentrações de contaminantes para valores aceitáveis e investimentos económicos associados muito elevados. Como conseqüência, a ênfase deve incidir na prevenção da contaminação como princípio base.

## 1.4 Objectivos e estrutura do Programa

O objectivo deste Programa é apresentar uma síntese dos conhecimentos existentes no âmbito da temática da gestão integrada e sustentável da qualidade das águas subterrâneas, bem como um exercício prospectivo das necessidades de investigação, de desenvolvimento e de actuação (resposta) no âmbito da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos que permita contribuir para assegurar a redução global da poluição e/ou a manutenção da qualidade das águas, tendo em vista alcançar um Bom estado das águas subterrâneas (químico e quantitativo) em 2015 (cf. Directiva-quadro da água).

O exercício prospectivo que se apresenta, efectuado com base numa análise crítica dos problemas já tratados e dos problemas em aberto, insere-se nos desafios mais vastos da gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos, ao nível da bacia hidrográfica, tendo em vista garantir um equilíbrio entre as diferentes actividades agrícolas, urbanas e industriais, nela desenvolvidas, e a preservação da quantidade e qualidade das águas subterrâneas.

Procurou-se que este Programa estivesse sincronizado com um novo ciclo de I&D que terá início em 2009: por um lado os novos Planos de Investigação Programada (PIP) do LNEC, PIP 2009-2012 e, por outro, uma das principais *call* do 7.º Programa-Quadro da União Europeia no Tema Ambiente (incluindo alterações climáticas) que termina a 8 de Janeiro de 2009.

O trabalho encontra-se organizado num conjunto de doze capítulos.

O **Capítulo 1**, o presente capítulo, aborda os grandes desafios da gestão integrada e utilização sustentável da água no século XXI, os motivos subjacentes à escolha do tema para o programa e os seus objectivos e estrutura.

No **Capítulo 2** apresenta-se uma síntese do enquadramento legislativo a atender no âmbito do tema tratado e dos programas propostos, com referência aos principais diplomas com relevância para a política integrada e sustentável das águas subterrâneas, suas exigências e metas a atingir. Particular ênfase é atribuída: (1) à Directiva-Quadro da Água (DQA, 2000/60/CE), primeiro instrumento legal Europeu com um sentido político, estratégico e integrador da gestão da água; (2) à Lei da Água (Lei n.º 58/2005) que transpõe a DQA para direito nacional, completando-a, propondo a consolidação do quadro legislativo vigente (disperso por inúmeros decretos-lei) e, também, criando condições para a adaptação e dotação da estrutura institucional vigente e dos instrumentos de gestão e (3) à Directiva das Águas Subterrâneas (DAS, 2006/118/CE) relativa à protecção das águas subterrâneas contra a contaminação e a deterioração.

São simultaneamente apresentados diversos outros diplomas essenciais na implementação de um conjunto de estratégias para a gestão integrada e sustentável do ambiente, o que implica que se conjuguem diversos requisitos legais com exequibilidade técnica, além do conhecimento

científico e dos aspectos socioeconómicos que exigem a consulta e a interligação entre múltiplos actores que actuam num mesmo domínio físico (políticos, administração central e local, investigadores, indústria, agricultura, ONG's, entre outros).

O **Capítulo 3** apresenta uma síntese das principais características físicas e químicas dos sistemas aquíferos e ilustra, de forma necessariamente breve, como é que diferentes especificidades hidrogeológicas podem originar diferentes impactes a pressões resultantes da exploração de águas subterrâneas e da poluição antropogénica. Constitui uma base teórica simplificada dos conhecimentos necessários para a compreensão do presente Programa em termos do estado da arte sobre o tema abordado, bem como do Programa de Estudos proposto em relação a alguns desses problemas, em termos da metodologia adoptada, dos objectivos a atingir e dos benefícios esperados da sua realização.

No mesmo capítulo introduzem-se algumas ferramentas para a gestão da água, como o uso de indicadores e de métodos adequados de monitorização, bem como o conceito gestão por Região Hidrográfica, tal como vem definido no art. 29.º da Lei da Água. Propõem-se, ainda, o uso do conceito DPSIR para o planeamento e a gestão da água de forma holística, ao nível da bacia hidrográfica, e num contexto que atenda aos efeitos que diferentes actividades económicas, sociais e ecológicas, existentes e planeadas, possam ter no uso e na qualidade das águas. Esta metodologia é utilizada ao longo deste Programa, quer na componente de análise do estado da arte quer depois no Programa de Estudos apresentado no Capítulo 10 e no Programa de Pós-graduação apresentado no Capítulo 11.

O **Capítulo 4** apresenta uma síntese da importância das águas subterrâneas no panorama nacional, em termos de consumos e de necessidades de água, para os sectores urbano, agrícola e industrial. Apresenta também uma síntese dos 58 sistemas aquíferos existentes e suas principais características, bem como das 91 massas de águas subterrâneas recentemente definidas pelo INAG (INAG, 2005) a nível de Portugal Continental, de acordo com o preceituado no Anexo II, Parte C da Directiva das Águas Subterrâneas. O capítulo termina com uma análise das principais características de qualidade natural das águas subterrâneas e com uma identificação dos principais problemas de poluição em Portugal.

Seleccionam-se três vertentes estratégicas para reflexão e aprofundamento em relação à temática qualidade dos recursos hídricos subterrâneos, selecção essa que resulta das forças motrizes que, a nosso ver, causam as principais pressões neste recurso:

- ◆ actividades potencialmente poluidoras (agricultura, golfe, estradas, aeroportos, lixeiras);
- ◆ pressões causadas por catástrofes 'naturais', usando como exemplo o caso dos fogos florestais;
- ◆ mudanças impostas pelas alterações climáticas.

Os **Capítulos 5, 6 e 7** abordam três vertentes identificadas como áreas prioritárias de actuação

para assegurar a redução gradual da poluição de águas subterrâneas. **Capítulo 5:** contaminação difusa de origem agrícola; **Capítulo 6:** contaminação proveniente de estradas e de aeroportos e **Capítulo 7:** impacte de lixeiras na qualidade das águas subterrâneas. Em cada um desses capítulos: apresenta-se uma análise da situação actual em Portugal e perspectivas futuras; descrevem-se os principais aspectos da contaminação e seus potenciais efeitos na qualidade das águas subterrâneas; as principais conclusões de projectos no respectivo domínio e termina-se com uma análise das necessidades de investigação. O **Capítulo 8** apresenta uma análise do efeito de fogos florestais na qualidade das águas subterrâneas, utilizando uma metodologia de abordagem semelhante à utilizada nos três capítulos que o antecedem.

Nos capítulos **5 a 8** contribui-se para uma apresentação global das principais pressões a que estão sujeitas as águas subterrâneas e a sua qualidade, tendo em consideração o impacte das principais actividades antropogénicas no estado do meio hídrico, visando avaliar as necessidades de investigação nos diferentes domínios por forma a dar uma resposta para proteger e melhorar a qualidade deste importante recurso (DPSIR).

No **Capítulo 9** analisam-se os principais efeitos que as características de variabilidade do clima actual podem ter na qualidade e quantidade dos recursos hídricos subterrâneos. Apresenta-se brevemente o estado da arte neste domínio, os potenciais impactes das alterações climáticas nas águas subterrâneas, os principais projectos e suas conclusões neste domínio e termina-se com uma análise das necessidades de investigação.

No **Capítulo 10**, propõe-se um conjunto de linhas de investigação e de desenvolvimento, materializadas em oito Programas de Estudos. O seu objectivo é contribuir para a efectivação de alguns dos aspectos fulcrais de uma atempada gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, tendo em vista a prevenção e o controlo da deterioração da qualidade da água, preconizados na DQA, das principais origens de contaminação e de deterioração a que estão, ou possam vir a estar, sujeitas. As principais linhas de força dos programas visam contribuir com respostas que permitam assegurar a redução global da poluição e/ou a manutenção da qualidade das águas, tendo em vista alcançar um Bom estado das águas subterrâneas (químico e quantitativo) em 2015.

O Programa de Pós-graduação é apresentado no **Capítulo 11**. Nele se explicita e delinea as oportunidades de formação decorrentes da execução do programa de investigação e se indica formas de as concretizar, através da apresentação do enquadramento científico, das linhas-mestras e dos meios humanos e materiais para realização de quatro planos de dissertações de mestrado e de quatro teses de doutoramento que se propõe venham a ser desenvolvidos no âmbito dos projectos.

Termina-se este Programa com o **Capítulo 12** que inclui um conjunto de considerações finais, nomeadamente uma síntese dos objectivos, dos programas e dos benefícios a alcançar, uma análise da sua exequibilidade, em termos de recursos humanos e financeiros.





## **2 ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO E METAS A ATINGIR**

---

O desenvolvimento de políticas ambientais tendo em vista a implementação de um conjunto de estratégias para a gestão integrada e sustentável do ambiente é um processo complexo, na medida em que implica que se conjuguem requisitos legais com exequibilidade técnica, conhecimento científico e aspectos socioeconómicos, o que exige a consulta e a interligação entre múltiplos actores que actuam num mesmo domínio físico (políticos, administração central e local, indústria, agricultura, investigação, ONG's, entre outros).

Em termos teóricos, dentro da política da União Europeia, designadamente no âmbito do 6.º Programa-Quadro, estes princípios estão consagrados, *i.e.* o conhecimento científico e a avaliação económica, com base em dados e em informação actualizada e fiável, transmitida através do uso de indicadores, devem servir de base para a implementação e avaliação das políticas ambientais (*knowledge-based approach*). Este processo implica um constante fornecimento de informação científica que suporte a implementação e a avaliação das políticas ambientais integrando os aspectos socioeconómicos e, para o caso das águas, utilizando a estrutura global de base de gestão por bacia hidrográfica.

Neste Capítulo 2 elabora-se uma síntese do enquadramento legislativo a atender no âmbito do tema tratado e dos programas propostos, com referência aos principais diplomas com relevância para a política integrada e sustentável das águas subterrâneas, suas exigências e metas a atingir. Geralmente esta informação encontra-se dispersa, o que não facilita tê-la em consideração na definição de estratégias de resposta para assegurar a protecção dos recursos hídricos. Particular ênfase é atribuída: (1) à Directiva-Quadro da Água (DQA, 2000/60/CE); (2) à Lei da Água (Lei n.º 58/2005) e (3) à Directiva das Águas Subterrâneas (DAS, 2006/118/CE).

A **Directiva-Quadro da Água** é o primeiro instrumento legal Europeu com um sentido político, estratégico e integrador da gestão da água, tendo sido aprovado durante a presidência

portuguesa da União Europeia em 2000. Foi transposta para direito nacional pela **Lei da Água (Lei n.º 58/2005)** que a completou, propondo a consolidação do quadro legislativo vigente (disperso por inúmeros decretos-lei) e, também, criando condições para a adaptação e dotação da estrutura institucional vigente e dos instrumentos de gestão tendo em vista uma maior operacionalidade política de gestão dos recursos hídricos portugueses para a efectiva aplicação da Lei. É, também, nesse contexto que foram recentemente criadas cinco Administrações das Regiões Hidrográficas (ARH, I.P.), Decreto-Lei n.º 208/2007 de 29 de Maio, e que foi aprovada a **Lei da Titularidade dos Recursos Hídricos, Lei n.º 54/2005**, de 15 de Novembro) que estabelece o que são águas públicas e águas privadas e o **Decreto-Lei n.º 226-A/2007**, de 31 de Maio que aprova um novo regime sobre as utilizações dos recursos hídricos e respectivos títulos.

O **Decreto-Lei n.º 77/2006**, de 30 de Março, complementa a transposição da Directiva n.º 2000/60/CE, designadamente no que diz respeito a um conjunto de especificações de índole essencialmente mais técnica, incluindo a análise e o controlo do estado das massas de água superficiais e subterrâneas, e os programas de monitorização e de medidas.

A Lei da Água define-se um novo sistema institucional para a gestão deste recurso, bem como o quadro jurídico para a sua utilização, incluindo o que se refere ao regime económico-financeiro da utilização da água. Fixam-se, também, objectivos ambientais e procedimentos de monitorização da qualidade da água, mecanismos para a informação e participação do público e um novo regime de contra-ordenações.

As principais linhas de força da DQA, e da Lei da Água, no que diz respeito à gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos referem que "os Estados-membros tomarão as medidas necessárias a fim de evitar ou limitar a descarga de contaminantes nas águas subterrâneas e de evitar a deterioração do estado de todas as massas de água". Os Estados-membros protegerão, melhorarão e reconstituirão todas as massas de águas subterrâneas, garantirão o equilíbrio entre as captações e as recargas dessas águas, com o objectivo de alcançar um bom estado das águas subterrâneas (químico e quantitativo) em 2015.

Em termos da qualidade das águas, o Bom estado das águas passou a integrar novos conceitos, sendo definido com base no estado biológico (para o caso das águas superficiais), hidromorfológico e físico-químico. O Quadro 1 apresenta as definições do que se entende por Bom estado das águas subterrâneas, do ponto de vista quantitativo e químico, segundo a DQA.

As disposições gerais previstas na DQA em relação à protecção e preservação das águas subterrâneas são complementadas através da **Directiva das Águas Subterrâneas (DAS)** que propõe medidas específicas, previstas nos n.ºs 1 e 2 do artigo 17.º da DQA, para impedir e controlar a deterioração e a contaminação das águas subterrâneas. Tal protecção é particularmente importante no que respeita aos ecossistemas dependentes das águas subterrâneas e à utilização destas águas para o abastecimento de água destinada ao consumo

humano. Para proteger o ambiente em geral e a saúde humana em particular, é imperativo evitar, prevenir ou reduzir as concentrações prejudiciais de contaminantes nocivos nas águas subterrâneas.

Quadro 1 - Definições do Bom estado das águas subterrâneas, do ponto de vista quantitativo e químico, segundo a DQA (cf. Directiva 2000/60/EC)

Elementos	Estado
<b>Bom estado quantitativo</b>	
<b>Nível freático</b>	<p>O nível da água na massa de águas subterrâneas é tal que os recursos hídricos subterrâneos disponíveis não são ultrapassados pela taxa média anual de captação a longo prazo.</p> <p>Assim, os níveis freáticos não estarão sujeitos a alterações antropogénicas que possam:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ impedir que sejam alcançados os objectivos ambientais especificados nos termos do artigo 4.º para as águas de superfície que lhe estão associadas;</li> <li>◆ deteriorar significativamente o estado dessas águas;</li> <li>◆ provocar danos significativos nos ecossistemas terrestres directamente dependentes do aquífero.</li> </ul> <p>Podem ocorrer temporária, ou continuamente em áreas limitadas, alterações na direcção do escoamento subterrâneo em consequência de variações de nível, desde que essas alterações não provoquem intrusões de água salgada, ou outras, e não indiquem uma tendência antropogenicamente induzida, constante e claramente identificada, susceptível de conduzir a tais intrusões.</p>
<b>Bom estado qualitativo</b>	
<b>Geral</b>	<p>A composição química da massa de águas subterrâneas é tal que as concentrações de poluentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ conforme especificado adiante, não apresentam os efeitos de intrusões salinas ou outras;</li> <li>◆ não ultrapassam as normas de qualidade aplicáveis nos termos de outros instrumentos jurídicos comunitários relevantes de acordo com o artigo 17.º da DQA;</li> <li>◆ não são de molde a impedir que sejam alcançados os objectivos ambientais especificados nos termos dos artigos 46.º e 48.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro, para as águas de superfície associadas, nem a reduzir significativamente a qualidade química ou ecológica dessas massas, nem a provocar danos significativos nos ecossistemas terrestres directamente dependentes da massa de águas subterrâneas.</li> </ul>
<b>Condutividade</b>	<p>As modificações da condutividade não revelam a ocorrência de intrusões salinas ou outras na massa de águas subterrâneas</p>

A DAS, relativa à protecção das águas subterrâneas contra a contaminação e a deterioração, propõe a adopção de medidas de prevenção e de controlo da contaminação das águas subterrâneas, incluindo critérios para a avaliação do seu bom estado químico e critérios para a

identificação de tendências significativas e persistentes para o aumento das concentrações de contaminantes, bem como para a definição de pontos de partida para a inversão dessas tendências.

A DQA e a DAS apontam um conjunto de substâncias que podem impedir que o estado de qualidade das águas atinja o Bom estado. Entre elas incluem-se:

- ◆ Substâncias referidas nos Anexos I e II da Directiva das Águas Subterrâneas;
- ◆ Lista de substâncias prioritárias (Decisão n.º 2455/2001/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 20 de Novembro de 2001, que estabelece a lista das substâncias prioritárias no domínio da política da água e altera a Directiva 2000/60/CE);
- ◆ Contaminantes emergentes (principalmente carcinogénicos e disruptores endócrinos).

O Quadro 2 apresenta uma lista das substâncias para a avaliação do estado químico das águas subterrâneas sumariadas em Hookey *et al.* (2006). Os mesmos autores agrupam as substâncias em classes que apresentam propriedades semelhantes de forma a facilitar a análise do seu comportamento no meio hídrico e ecossistemas associados.

Quadro 2 - Substâncias identificadas na Directiva-Quadro da Água e na Directiva das Águas Subterrâneas (adaptado de Hookey *et al.*, 2006)

<b>CLASSE</b>	<b>Directiva águas subterrâneas</b>	<b>Substâncias Prioritárias</b>	<b>Contaminantes emergentes</b>
<b>Metais pesados</b>	Cádmio Chumbo Mercúrio	Cádmio e compostos de cádmio Chumbo e compostos de chumbo Mercúrio e compostos de mercúrio Níquel e compostos de níquel	
<b>Metais orgânicos</b>		Composto de tributilo estanho	Compostos organostanhosos
<b>Compostos de azoto</b>	Amónio Nitrato		
<b>Aniões</b>	Arsénio Cloreto Sulfato		
<b>Pesticidas</b>	Pesticidas e derivados	Alacloro Atrazina Clorfenvinfos Clorpirifos Isoproturão Diurão Endosulfão Simazina Trifluralina	Diclofluanida Triclosano
<b>Hidrocarbonetos</b>		Antraceno Benzeno Fluoranteno	

CLASSE	Directiva águas subterrâneas	Substâncias Prioritárias	Contaminantes emergentes
		Naftaleno Hidrocarbonetos poliaromáticos	
<b>Hidrocarbonetos cloretados</b>	Tetracloroetano Tricloroetano	1,2-Dicloroetano Éteres difenílicos bromados C10-13-cloroalcanos Diclorometano Hexaclorobenzeno Hexaclorobutadieno Hexaclorociclohexano Pentaclorobenzeno Pentaclorofenol Triclorbenzenos Triclorometano	
<b>Fenóis e compostos relacionados</b>		Octilfenóis Nonilfenóis	2,6-di-terbutilfenol Etoxilatos Ácidos acéticos Benzofenona Etoxilatos O-fenilfen
<b>Disruptores endócrinos</b>		Di(2-etilhexil)ftalato (DEHP)	Etinil estradiol 17 alfa Estradiol 17 alfa Bifenol A Hidroxitolueno Coprostanol 3 beta ol Estrogénio Farmacêuticos Tetrabromobifenol A

Em complemento às duas directivas referidas e à Lei da Água, instrumentos que enquadram toda a política Europeia para as próximas décadas no domínio da água, e à luz da Estratégia de Desenvolvimento Sustentável da UE, é fundamental que haja uma política de coordenação e de integração ambiental sobre vários aspectos relevantes e que interactuam com a política dos recursos hídricos tal como vem definida na DQA e na DAS. Procurou-se sistematizar o principal conjunto de diplomas a considerar, dividindo-o em instrumentos de prevenção e de controlo, de áreas protegidas e para definição de critérios de qualidade (cf. Fig. 2 e Quadro 3):

- (1) à **prevenção e controlo** de águas e resíduos gerados pelas diversas actividades ou pressões geradas numa bacia;
- (2) à definição de **áreas protegidas** dentro de cada bacia hidrográfica, incluindo todas as massas de água subterrânea usadas para consumo humano e todas as áreas protegidas, e
- (3) aos **critérios de qualidade** das massas de água.

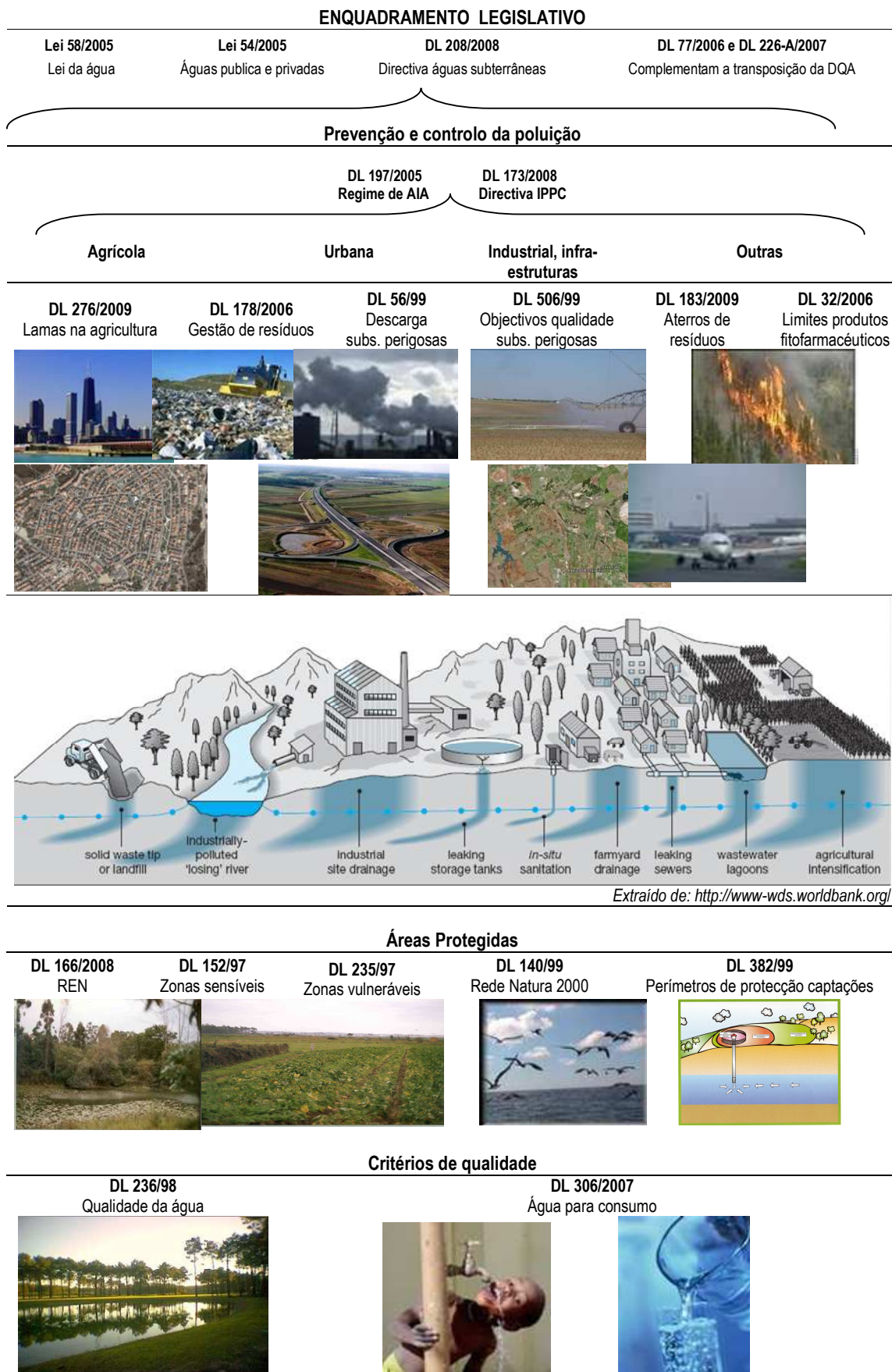


Fig. 2 - Esquematização do enquadramento global da legislação sobre águas subterrâneas

Quadro 3 - Lista dos principais diplomas legais de protecção das águas subterrâneas

Tema	Designação abreviada	Legislação Nacional	Legislação Europeia
Enquadramento	Lei da Água	<b>Lei 58/2005</b> - estabelece as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas - Lei da Água <b>Lei 54/2005</b> - estabelece o que são águas públicas e águas privadas <b>Decreto-Lei 77/2006 e Decreto-Lei 226-A/2007</b> - complementam a transposição da Directiva 2000/60 e a Lei 58/2005	Directiva 2000/60 - DQA
	Directiva das águas subterrâneas	<b>Decreto-Lei 208/2008</b> – relativo à protecção das águas subterrâneas contra a contaminação e a deterioração	Directiva 2006/118 - DAS
Prevenção e controlo da poluição	Utilização de lamas em solos agrícolas	<b>Decreto-Lei 276/2009</b> - estabelece o regime de utilização de lamas de depuração em solos agrícolas	Directiva 86/278
	Gestão de resíduos	<b>Decreto-Lei 178/2006</b> - relativo às regras a que fica sujeita a gestão de resíduos	Directivas 91/156; 91/689; 2006/12
	Descarga de substâncias perigosas	<b>Decreto-Lei 56/99</b> - relativo aos valores limite e aos objectivos de qualidade para a descarga de certas substâncias perigosas	Directivas 86/280; 88/347; 90/415
	Objectivos de qualidade substâncias perigosas	<b>Decreto-Lei 506/99</b> - fixa os objectivos de qualidade para determinadas substâncias perigosas incluídas nas famílias ou grupos de substâncias da lista II do Anexo XIX ao Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto	-
	Regime de AIA	<b>Decreto-Lei 197/2005</b> (DL 69/2000, DL 74/2001, DL 232/2007) - aprova o regime jurídico da avaliação de impacte ambiental	Directivas 85/337; 97/11; 2001/42; 2003/35
	Directiva IPPC	<b>Decreto-Lei 173/2008</b> - prevenção e controlo integrados da contaminação, directiva IPPC	Directivas 96/61; 2003/35; 2008/1
Áreas protegidas	Directiva aterros de resíduos	<b>Decreto-Lei 183/2009</b> - regula a instalação, a exploração, o encerramento e a manutenção pós-encerramento de aterros destinados a resíduos	Directivas 99/31; 2003/33
	Regime de produtos fitofarmacêuticos	<b>Decreto-Lei 22/2005</b> - estabelece o regime aplicável à colocação no mercado de produtos fitofarmacêuticos	Directiva 91/414
	Limites máximos produtos fitofarmacêuticos	<b>Decreto-Lei 32/2006</b> - fixa os limites máximos de resíduos de substâncias activas de produtos fitofarmacêuticos	Directivas 2004/95; 2004/115; 2005/37; 2005/46
Áreas protegidas	REN	<b>Decreto-Lei 166/2008</b> - Reserva Ecológica Nacional	-
	Zonas sensíveis	<b>Decreto-Lei 152/97</b> (DL 198/98, DL 348/98, DL 172/2001 e DL 149/2004) - definição de zonas sensíveis à descarga de águas residuais urbanas. Relativo à recolha, tratamento e descarga de águas residuais urbanas no meio aquático	Directivas 91/271; 98/15
	Zonas vulneráveis	<b>Decreto-Lei 235/97</b> (DL 68/99) - zonas vulneráveis à contaminação causada por nitratos de origem agrícola	Directiva 91/676
	Rede Natura 2000	<b>Decreto-Lei 140/99</b> (DL 49/2005, RCM 177/2008) - Rede Natura 2000	Directivas 92/43; 97/62; 79/409
Critérios de qualidade	Perímetros de protecção de captações	<b>Decreto-Lei 382/99</b> (DL 226-A/2007, DL 391-A/2007, DL 93/2008, Portaria n.º 1114/2009) - perímetro de protecção de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público	-
	Qualidade do meio aquático para diversos usos	<b>Decreto-Lei 236/98</b> (DL 506/99, DL 236/98 e DL 261/2003) - normas, critérios e objectivos de qualidade visando proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos principais usos	Directivas 75/440; 76/160; 76/464; 78/659; 79/869; 79/923; 80/68; 80/778
	Água para consumo humano	<b>Decreto-Lei 306/2007</b> - qualidade da água destinada ao consumo humano	Directiva 98/83

Apresentam-se sumariamente os principais diplomas com relevância para a política integrada e sustentável das águas subterrâneas.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 276/2009**, de 2 de Outubro - Estabelece o **regime a que obedece a utilização de lamas de depuração em solos agrícolas** de forma a evitar efeitos nocivos para o homem, para a água, para os solos, para a vegetação e para os animais e a promover a sua correcta utilização (transpõe para direito nacional a Directiva n.º 86/278/CE; revoga o DL n.º 446/91, de 22 de Novembro e o DL n.º 118/2006, de 21 de Junho).

Este diploma incentiva o uso de certas lamas de depuração em solos agrícolas provenientes de estações de tratamento de águas residuais domésticas, urbanas, de actividades agropecuárias, de fossas sépticas ou outras de composição similar. As lamas tratadas têm que ter passado por um tratamento biológico, químico ou térmico ou outro processo apropriado que reduza significativamente a hipótese de risco para a saúde pelo seu uso. Devem, ainda, ser tidas em conta as necessidades de nutrientes da planta, bem como a necessidade de manter a qualidade dos solos, das águas subterrâneas e de superfície.

O diploma estabelece valores limite para a concentração de metais pesados em lamas para serem utilizadas na agricultura, bem como os valores máximos a serem aplicados por hectare e as zonas de separação onde é vedada a possibilidade de utilização de lamas. Estabelece ainda os valores limite de concentração de compostos orgânicos e dioxinas nas lamas destinadas à agricultura, produzidas em estações de tratamento de águas residuais urbanas que recebam águas residuais de outras origens para além da doméstica. O diploma refere a frequência das análises das lamas destinadas à agricultura e dos solos, parâmetros a analisar, métodos de amostragem e de análise e normas de referência a seguir.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 178/2006**, de 5 de Setembro - Estabelece as regras a que fica sujeita a **gestão de resíduos**. Revoga o DL n.º 310/95, de 20 de Novembro, o qual transpôs as Directivas 91/156/CE, de 18 de Março, e 91/689/CE, de 12 de Dezembro, e o DL n.º 239/97, de 9 de Setembro. Transpõe para o ordenamento jurídico interno a Directiva 2006/12/CE, de 5 de Abril.

O diploma estabelece as regras a que fica sujeita a gestão de resíduos, nomeadamente a sua recolha, transporte, armazenagem, tratamento, valorização e eliminação, por forma a não constituir perigo ou causar prejuízo para a saúde humana ou para o ambiente. A sua importância no contexto dos recursos hídricos subterrâneos decorre da ênfase que é dada à defesa da natureza e do ambiente, ou à preservação dos recursos naturais, estruturando uma política de resíduos num lugar de destaque de uma mais vasta política de ambiente.



Reafirma o princípio da responsabilidade do produtor pelos resíduos que produz e introduz um mecanismo autónomo de autorização prévia das operações de gestão de resíduos.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 56/99**, de 26 de Fevereiro - Relativo aos valores limite e aos objectivos de qualidade para a **descarga de certas substâncias perigosas** (com as alterações impostas pelo DL n.º 390/99, de 30 de Setembro, transpõe para o direito interno a Directiva n.º 86/280/CE, de 12 de Junho, a Directiva n.º 88/347/CE, de 16 de Junho, que altera o Anexo II da Directiva n.º 86/280/CE e a Directiva n.º 90/415/CE, de 27 de Julho).

Este decreto estabelece valores limite, objectivos de qualidade, métodos de referência e processo de controlo relativamente à descarga de substâncias perigosas.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 506/99**, de 20 de Novembro - Fixa os **objectivos de qualidade para determinadas substâncias perigosas** incluídas nas famílias ou grupos de substâncias da lista II do Anexo XIX ao DL n.º 236/98, de 1 de Agosto.

As disposições do diploma destinam-se a reduzir a contaminação dos meios aquáticos provocada pelas descargas pontuais e difusas de águas residuais através da fixação de objectivos de qualidade para determinadas substâncias perigosas incluídas nas famílias ou grupos de substâncias da lista II do Anexo XIX ao DL n.º 236/98, de 1 de Agosto.

No diploma fixam-se os objectivos de qualidade para um conjunto de substâncias consideradas prioritárias em função das condições respectivas de persistência, toxicidade e bioacumulação. Refere-se a substâncias que, em condições naturais, não estão presentes nos meios aquáticos, pelo que serão normalmente introduzidas, directa ou indirectamente, por descargas de águas residuais, por lixiviação ou por excedentes de rega.

Os objectivos de qualidade definidos servem de referência para a definição dos programas de acompanhamento e vigilância para detecção da presença dessas substâncias no meio aquático e para a definição dos programas de medidas adequados para eliminar ou reduzir a contaminação nos meios aquáticos, sempre que os objectivos de qualidade sejam excedidos.

- ◆ **DL n.º 197/2005**, de 8 de Novembro - Aprova o regime jurídico da **avaliação de impacte ambiental**, transpondo para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 85/337/CE, com as alterações introduzidas pela Directiva n.º 97/11/CE, de 3 de Março de 1997 (com as alterações impostas pelo DL n.º 74/2001, de 26 de Fevereiro). Inclui em anexo a publicação do DL n.º 69/2000, de 3 de Maio, alterado, e transpõe parcialmente para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2003/35/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 26 de Maio.

O diploma estabelece o regime jurídico da avaliação do impacte ambiental dos projectos públicos e privados susceptíveis de produzirem efeitos significativos no ambiente. A

avaliação de impacte ambiental é um instrumento preventivo fundamental da política do ambiente e do ordenamento do território. Constitui uma forma privilegiada de promover o desenvolvimento sustentável, pela gestão equilibrada dos recursos naturais, assegurando a protecção da qualidade do ambiente e, assim, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida do Homem.

No seio da avaliação de impactes ambientais, há que referir o DL n.º 232/2007, de 15 de Junho, sobre a avaliação ambiental estratégica (AAE), na medida em que é uma extensão da legislação sobre AIA ao estabelecer o regime a que fica sujeita a avaliação dos efeitos de determinados planos e programas no ambiente. Transpõe as Directivas n.º 2001/42, de 27 de Junho, e a n.º 2003/35, de 26 de Maio.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 173/2008**, de 26 de Agosto que transpõe a Directiva n.º 96/61/CE, relativa à prevenção e controlo integrados da contaminação, conhecida por **Directiva IPPC**, com as alterações que lhe foram introduzidas pela Directiva n.º 2003/35/CE, de 26 de Maio, relativa à participação do público na elaboração de certos planos e programas relativos ao ambiente, codificada pela Directiva n.º 2008/1/CE, de 15 de Janeiro, relativa à prevenção e controlo integrados da poluição. Revoga o DL n.º 194/2000, de 21 de Agosto.

O decreto introduz o princípio da "abordagem integrada", instituindo um novo quadro procedimental - a licença ambiental - decisão escrita que estabelece as medidas destinadas a evitar, ou se tal não for possível, a reduzir as emissões para o ar, a água e o solo, a produção de resíduos e a contaminação sonora, visando garantir a prevenção e o controlo integrados da contaminação proveniente de determinadas instalações industriais. Faz referência especificamente às águas subterrâneas ao indicar que as licenças devem garantir a adequada protecção dos solos e águas subterrâneas. Institui, também, o conceito de "melhores técnicas disponíveis" (MTDS) - técnicas mais eficazes, desenvolvidas a uma escala que possibilite a sua aplicação em condições económica e tecnicamente viáveis, para alcançar um nível geral elevado de protecção do ambiente no seu todo.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 183/2009**, de 10 de Agosto - estabelece o **regime jurídico da deposição de resíduos em aterro** e os requisitos gerais a observar na concepção, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros, incluindo as características técnicas específicas para cada classe de aterros (transpõe as Directivas n.º 99/31/CE e n.º 2003/33; revoga os Decretos-Lei n.º 321/99, de 11 de Agosto e n.º 152/2002, de 23 de Maio).

A deposição de resíduos em aterros constitui uma particular operação de gestão de resíduos que, em Portugal, encontra no DL n.º 239/97, de 9 de Setembro, ou Lei Quadro dos Resíduos, as regras gerais do seu exercício e no DL n.º 321/99, de 11 de Agosto, o regime legal aplicável a aterros de resíduos industriais banais. Este decreto visa regular a instalação, a exploração, o encerramento e a manutenção pós-encerramento de aterros

destinados a resíduos, por forma a evitar ou a reduzir tanto quanto possível os efeitos negativos sobre o ambiente, quer à escala local, em especial a contaminação das águas de superfície, das águas subterrâneas, do solo e da atmosfera, quer à escala global, em particular o efeito de estufa, bem como quaisquer riscos para a saúde humana.

De forma equivalente à directiva IPPC, estabelece os requisitos necessários à emissão de licenças com base num conjunto de condições incluindo os estudos de impacte ambiental. Em relação às águas subterrâneas, as características geológicas e hidrogeológicas do local devem ser tais que impeçam as águas subterrâneas de interferirem com os resíduos e devem ser tomadas medidas apropriadas que colectem e tratem o lixiviado e as águas contaminadas de forma a evitar a contaminação dos solos, das águas subterrâneas e superficiais usando técnicas de precaução apropriadas. A directiva estabelece critérios para a aceitação do lixo tendo em consideração a protecção do ambiente circundante, incluindo as águas subterrâneas.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 22/2005**, de 26 de Janeiro - estabelece o regime aplicável à **colocação no mercado de produtos fitofarmacêuticos** (transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 91/414/CE, de 15 de Julho).

Este diploma é relativo às autorizações de colocação no mercado concedidas para produtos fitofarmacêuticos que contenham substâncias activas. Esta autorização só pode ser garantida se os produtos não tiverem, directa ou indirectamente, efeitos nocivos para a saúde humana ou para o ambiente, em particular para a contaminação de água para consumo, incluindo as águas subterrâneas.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 32/2006**, de 15 de Fevereiro - Fixa os limites máximos de resíduos de **substâncias activas de produtos fitofarmacêuticos**.

Este diploma fixa os limites máximos de resíduos de substâncias activas de produtos fitofarmacêuticos, permitidos nos produtos agrícolas de origem vegetal, possibilitando que a agricultura nacional propicie o acesso a produtos mais seguros para o consumidor, contribuindo, deste modo, para uma mais eficaz política de saúde e segurança alimentar.

Um dos aspectos fundamentais deste decreto prende-se com a prevenção da contaminação de águas subterrâneas através do controlo do tipo de produtos fitofarmacêuticos e dos limites máximos a serem usados na actividade agrícola. A autorização só é concedida se se provar que os produtos utilizados não causam danos, directos ou indirectos, para a saúde humana ou nas águas subterrâneas, em particular para a contaminação de águas incluindo águas para consumo e águas subterrâneas. A autorização não pode ser concedida se a concentração das substâncias activas ou metabolitos, produtos de degradação ou de reacção nas águas subterrâneas, exceder o máximo permitido (Directiva 80/778/CE) entre outras restrições impostas.

Em complemento às medidas de prevenção e de controlo da contaminação previstas nos diplomas referidos, está prevista a definição de áreas protegidas dentro de cada bacia hidrográfica. Entre estas destacam-se a directiva das zonas vulneráveis à contaminação por nitratos, zonas sensíveis à descarga de águas residuais urbanas bem como as áreas designadas para a protecção de habitats e espécies protegidas incluindo os sítios da Rede Natura 2000. Estes registos devem ser revistos no âmbito dos Planos de Gestão de Bacia Hidrográfica (PGBH). Apresentam-se os principais diplomas a atender nesta matéria.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 166/2008**, de 22 de Agosto - Revê o Regime Jurídico da **Reserva Ecológica Nacional** (revoga o DL n.º 321/83, de 5 de Julho, que cria a Reserva Ecológica Nacional, o DL n.º 411/83, de 23 de Novembro e o DL n.º 93/90, de 19 de Março. Foi alterado pelos DL n.º 316/90, de 13 de Outubro, que prevê a intervenção do Ministério do Ambiente e Recursos Naturais na gestão da Reserva Ecológica Nacional; DL 213/92, de 12 de Outubro; DL n.º 79/95, de 20 de Abril (DR 93/95, Série I-A); DL n.º 203/2002, de 1 de Outubro, que reforça a participação das autarquias locais, nomeadamente no que concerne a novas delimitações da REN; DL n.º 180/2006, de 9 de Junho).

O diploma institui a REN (Reserva Ecológica Nacional), estrutura biofísica básica e diversificada que, através do condicionamento à utilização de áreas com características ecológicas específicas, garante a protecção de ecossistemas e a permanência e intensificação dos processos biológicos indispensáveis ao enquadramento equilibrado das actividades humanas.

O diploma tem a finalidade de possibilitar a exploração dos recursos e a utilização do território com salvaguarda de determinadas funções e potencialidades, de que dependem o equilíbrio ecológico e a estrutura biofísica das regiões, bem como a permanência de muitos dos seus valores económicos, sociais e culturais. Em relação às águas subterrâneas são integradas na REN as áreas de infiltração máxima.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 152/97**, de 19 de Junho - **Zonas sensíveis à descarga de águas residuais urbanas** que transpõe a Directiva n.º 91/271/CE no que diz respeito a algumas das condições gerais a que uma dada utilização do domínio hídrico, a descarga de águas residuais urbanas nos meios aquáticos, deve observar (com as alterações impostas pelos DL n.º 348/98, de 9 de Novembro, que transpõe a directiva 98/15/CE, DL n.º 172/2001 de 26 de Maio e DL n.º 149/2004, de 22 de Junho).

Constitui objectivo deste decreto a protecção das águas superficiais dos efeitos adversos das descargas de águas residuais urbanas e de alguns sectores industriais, que se integra no objectivo mais vasto da protecção do ambiente. Este decreto relativo à recolha, ao tratamento e à descarga de águas residuais urbanas no meio aquático é indirectamente relevante para as águas subterrâneas na medida em que estas poderão receber contaminação resultante da descarga de águas residuais através das águas de superfície

com que possam contactar.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 235/97**, de 3 de Setembro – **Zonas vulneráveis** à contaminação causada por nitratos de origem agrícola (com as alterações que lhe foram introduzidas pelo DL n.º 68/99, de 11 de Março, que transpõe a Directiva n.º 91/676/CE do Conselho, de 12 de Dezembro) (Portaria n.º 1100/2004 de 3 de Setembro – lista das zonas vulneráveis. Portaria n.º 1037/97, de 1 de Outubro, que aprova a lista e a carta que identificam as águas poluídas por nitratos e as áreas designadas por "zonas vulneráveis"). Os seus objectivos são a redução da contaminação das águas causada ou induzida por nitratos de origem agrícola, bem como impedir a propagação desta contaminação, através da aplicação de um Código de Boas Práticas Agrícolas.

Esta Directiva obriga os Estados-membros a identificar zonas vulneráveis que correspondem às áreas que drenam para as águas, incluindo as águas subterrâneas, nas quais se pratiquem actividades agrícolas susceptíveis de contribuir para a contaminação das mesmas. É feita referência a programas de acção a fim de assegurar um nível geral de protecção de todas as águas contra a contaminação causada ou induzida por nitratos de origem agrícola, incluindo um Código de Boas Práticas Agrícolas e os requisitos para identificar zonas vulneráveis de águas subterrâneas como aquelas que contenham ou apresentem risco de conter uma concentração de nitratos superior a 50 mg/l, se não forem tomadas as medidas previstas nos programas de acção.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 140/99**, de 24 de Abril – Rede Natura 2000 - Cria uma rede ecológica coerente, denominada Rede Natura 2000, visando a conservação da natureza e da diversidade biológica, com as alterações posteriores impostas pelo DL n.º 49/2005, de 24 de Fevereiro (revoga os Decretos-Leis n.ºs 75/91, de 14 de Fevereiro, e 226/97, de 27 de Agosto e transpõe as Directivas 92/43/CE; 97/62/CE e 79/409/CE). Este diploma é complementado e operacionalizado pelo Plano Sectorial da Rede Natura, aprovado pela RCM 177/2008, de 24 de Novembro.

Resultando da aplicação de duas directivas comunitárias distintas, a Rede Natura 2000 tem como objectivos fundamentais contribuir para assegurar a conservação dos habitats de espécies de aves listadas no Anexo I da Directiva n.º 79/409/CE, de 2 de Abril (Directiva Aves), bem como dos habitats naturais do Anexo I e dos habitats de espécies da flora e da fauna do Anexo II da Directiva n.º 92/43/CE, de 21 de Maio (Directiva Habitats), considerados ameaçados ou significativos no espaço da União Europeia. A salvaguarda dos recursos e dos valores naturais dos locais integrados no processo de Rede Natura 2000, de que se destaca a água em quantidade e qualidade, é fundamental devendo ser fixados os usos e o regime de gestão compatíveis com a utilização sustentável do território.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 382/99**, de 22 de Setembro – Perímetro de protecção de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público. Por seu lado, ao abrigo do n.º 1

do artigo 43.º do DL n.º 226-A/2007, de 31 de Maio, com as alterações introduzidas pelos DL n.º 391-A/2007, de 21 de Dezembro, e 93/2008, de 4 de Junho, e de acordo com o disposto no artigo 37.º da Lei da Água, a Portaria n.º 1114/2009 estabelece os termos da delimitação dos perímetros de protecção das captações destinadas ao abastecimento público de água para consumo humano, bem como os respectivos condicionamentos.

O DL n.º 382/99 estabelece as normas e os critérios para a delimitação de perímetros de protecção de captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público, com a finalidade de proteger a qualidade das águas dessas captações.

A protecção das águas subterrâneas constitui um objectivo estratégico da maior importância no quadro de um desenvolvimento equilibrado e duradouro. Porém, a qualidade das águas subterrâneas é susceptível de ser afectada pelas actividades socioeconómicas, designadamente pelos usos e ocupações do solo, em particular pelas áreas urbanas, infra-estruturas e equipamentos, agricultura e zonas verdes.

Nesse contexto, este diploma é um instrumento preventivo para assegurar a protecção das águas subterrâneas através da instituição de perímetros de protecção das captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público. Trata-se de áreas definidas na vizinhança dessas captações em que se estabelecem restrições de utilidade pública ao uso e transformação do solo, em função das características pertinentes às formações geológicas, que armazenam as águas subterrâneas exploradas pelas captações e dos caudais extraídos, como forma de salvaguardar a protecção da qualidade dessas águas subterrâneas.

Os perímetros de protecção das captações de águas subterrâneas destinadas ao abastecimento público visam, assim:

- ◆ prevenir, reduzir e controlar a contaminação das águas subterrâneas por infiltração de águas pluviais lixiviantes e de águas excedentes de rega e de lavagens;
- ◆ potenciar os processos naturais de diluição e de autodepuração das águas subterrâneas;
- ◆ prevenir, reduzir e controlar as descargas acidentais de contaminantes;
- ◆ proporcionar a criação de sistemas de aviso e alerta para a protecção dos sistemas de abastecimento de água com origem nas captações de águas subterrâneas, em situações de contaminação acidental dessas águas.

As normas, critérios e objectivos de qualidade da água são estabelecidos através de dois diplomas principais, o primeiro dos quais tem em atenção os usos gerais a que se destina e o segundo é específico para a qualidade da água destinada ao consumo humano. Apresenta-se em seguida uma breve síntese dos seus conteúdos.

- ◆ **Decreto-Lei n.º 236/98**, de 1 de Agosto - Estabelece **normas, critérios e objectivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos** (revoga o DL n.º 74/90, de 7 de Março).

Numa perspectiva de protecção da saúde pública, de gestão integrada dos recursos hídricos e de preservação do ambiente, este diploma legal clarifica as competências das várias entidades intervenientes no domínio da qualidade da água, e concilia esta matéria com alterações legislativas relacionadas com o planeamento dos recursos hídricos e o licenciamento das utilizações do domínio hídrico.

O DL n.º 506/99, de 20 de Novembro - fixa os objectivos de qualidade para determinadas substâncias perigosas incluídas nas famílias ou grupos de substâncias da lista II do Anexo XIX ao DL n.º 236/98, de 1 de Agosto (com as alterações do DL n.º 261/2003, de 21 de Outubro).

- ◆ **Decreto-Lei n.º 306/2007**, de 27 de Agosto - **qualidade da água destinada ao consumo humano** (revoga o DL n.º 243/2001 de 5 de Setembro).

Aprova normas relativas à qualidade da água destinada ao consumo humano transpondo para o direito interno a Directiva n.º 98/83/CE, do Conselho, de 3 de Novembro, relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano. Tem por objectivo proteger a saúde humana dos efeitos nocivos resultantes da eventual contaminação dessa água e assegurar a disponibilização tendencialmente universal de água salubre, limpa e desejavelmente equilibrada na sua composição.

Também o artigo 4.º da DQA requer que os resíduos sejam depositados de forma a não comprometer o ambiente, aspecto que também se traduz no efeito de protecção das águas subterrâneas.

No contexto do enquadramento legislativo sumariamente apresentado, e tendo em consideração os novos planos e programas criados neste último quadriénio em Portugal (PEAASAR 2007/12, Programa de Desenvolvimento Rural 2007-2013 de Portugal, entre outros), estamos perante novas exigências no campo do planeamento e da gestão da água, exigências aliás há muito esperadas para contribuir para evitar a degradação e a falta temporária de recursos num país onde as disponibilidades hídricas são tão irregulares, tanto no espaço como no tempo.

Por outro lado, a primeira geração dos Planos de Gestão de Bacia Hidrográfica (PGBH), a ser realizada até ao final de 2009, tal como o preconizado na DQA, deve incluir uma síntese das pressões e dos impactes das actividades antropogénicas da bacia no estado das águas subterrâneas. Estes registos devem ser revistos de seis em seis anos no âmbito dos PGBH. Com base nessa informação, e visando atingir os objectivos ambientais impostos pela DQA,

deve ser estabelecido um programa de medidas que inclua, para o caso das águas subterrâneas, o controlo das extracções, o controlo da recarga artificial (de forma a não comprometer os objectivos ambientais), bem como medidas de controlo e de prevenção da contaminação através de descargas tóxicas ou difusas. Este programa será estabelecido até ao final de 2009 para estar operacional no final de 2012.

Em síntese, a DQA e a DAS irão complementar e assegurar a continuidade do regime de protecção dos diversos diplomas referidos neste domínio. Isto será conseguido através de uma análise sistemática das pressões e impactes e dos requisitos para atingir o Bom estado e as tendências de evolução da contaminação através de programas de controlo e vigilância.

Espera-se que estes sejam instrumentos com retorno ambiental que possam contribuir de forma clara para serem cumpridas as metas estabelecidas para a qualidade e quantidade da água em 2015 e não apenas investimentos em obras cujas repercussões a nível do ambiente não sejam claras.





## **3 CONCEITOS TEÓRICOS PARA A GESTÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

---

### **3.1 Introdução**

Este capítulo apresenta uma síntese das principais características físicas e químicas dos sistemas aquíferos e ilustra, de forma necessariamente breve, como é que diferentes especificidades hidrogeológicas podem originar diferentes impactes a pressões resultantes da exploração de águas subterrâneas e da poluição antropogénica. Constitui uma base teórica simplificada dos conhecimentos necessários para a compreensão do presente Programa em termos do estado da arte sobre o tema abordado, bem como do Programa de Estudos proposto em relação a alguns desses problemas, em termos da metodologia adoptada, dos objectivos a atingir e dos benefícios esperados da sua realização.

Uma análise mais aprofundada sobre esta temática pode ser consultada em diversos livros da especialidade, de que se destacam Bear (1972), Custodio e Llamas (1976), Freeze e Cherry (1979), Bear e Verruijt (1987) e Appelo e Postma (1993), entre outros.

### **3.2 Águas subterrâneas: uma parte do Ciclo Hidrológico ...**

As águas subterrâneas são parte integrante do ciclo hidrológico terrestre que descreve a incessante troca de água entre o oceano, a atmosfera e a terra. A Fig. 3 representa de forma esquemática o ciclo hidrológico, destacando-se a componente do ciclo relativa às águas subterrâneas, de maior relevância para este Programa. Com base no texto apresentado em Lobo Ferreira *et al.* (2008), apresenta-se uma breve descrição deste ciclo, com especial destaque para os processos relevantes para uma gestão integrada e sustentável dos recursos

hídricos subterrâneos.

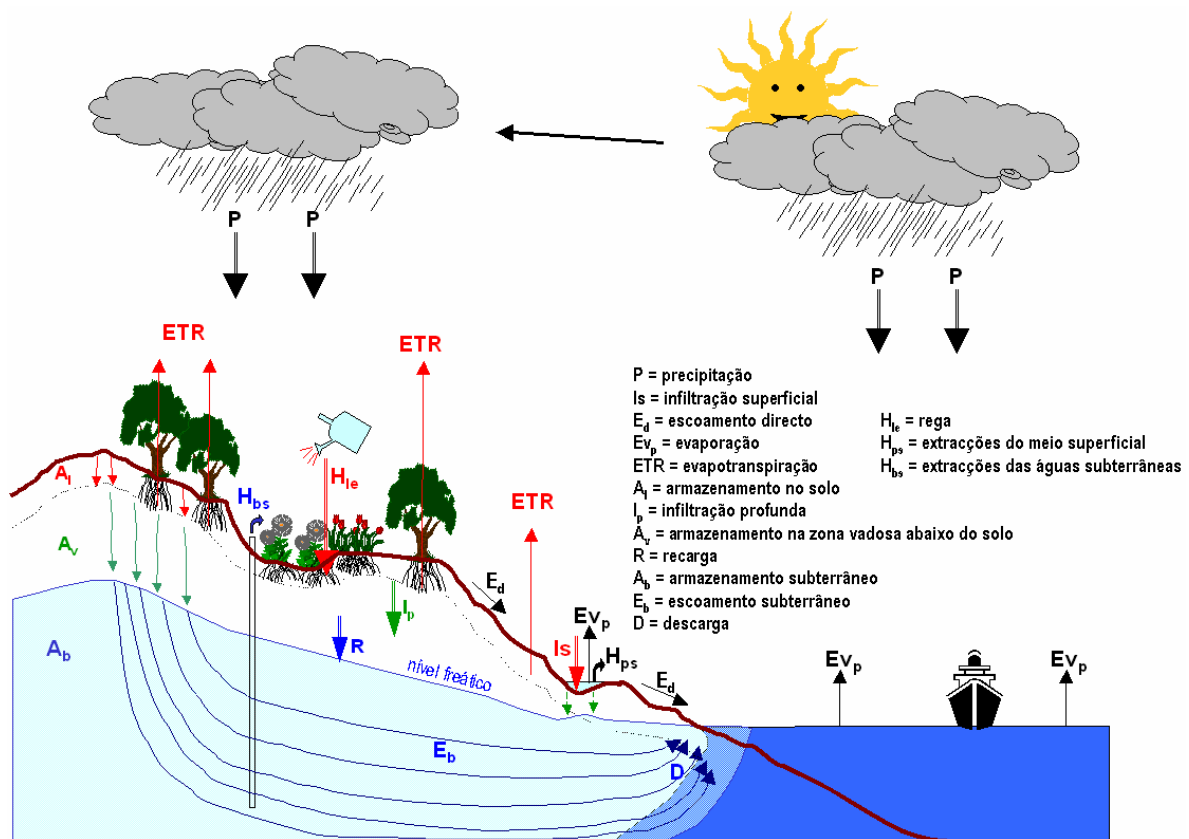


Fig. 3 - Representação esquemática do ciclo hidrológico (extraído de Lobo Ferreira *et al.*, 2008)

A água da precipitação atinge directamente a superfície terrestre ou é interceptada pela vegetação. A água que é interceptada pela vegetação fica armazenada e posteriormente pode ser evaporada. A água que atinge a superfície terrestre pode acumular-se em corpos hídricos superficiais (lagos, mares), e daí evaporar-se ou infiltrar-se, pode cair sobre cursos de água e evaporar-se, ser transportada por esses cursos de água para outros locais (normalmente lagos ou mares) ou infiltrar-se, ou pode cair directamente na superfície terrestre seca e infiltrar-se para horizontes mais profundos pela acção da gravidade até que a capacidade de infiltração do solo desse local seja atingida. Quando o solo fica saturado e a precipitação excede a capacidade de infiltração do solo, há encharcamento do solo e/ou geração de escoamento à superfície, em direcção aos cursos de água, aos oceanos ou aos lagos (Lobo Ferreira *et al.*, 2008).

A água que se infiltra no solo fica sujeita a evaporação, pode ser absorvida pelas plantas, sendo posteriormente evapotranspirada (regressando à atmosfera), ou pode escoar em profundidade em direcção à zona saturada subsuperficial. A água que atinge a zona saturada é designada por água de recarga. O escoamento na zona saturada dá-se dos locais de recarga para os locais de descarga (nascentes). A descarga devolve a água à superfície directamente para as massas de água superficiais (cursos de água, lagos ou oceanos), para zonas de

encharcamento ou para escoamento superficial que se encaminha para as massas de água. Nas massas de água superficiais a água pode escoar, evaporar-se ou infiltrar-se novamente no solo. A água evaporada forma nuvens que podem deslocar-se para outros locais. Quando as nuvens condensam, ocorre precipitação, fechando-se o ciclo hidrológico.

A água que se infiltra no solo por acção da gravidade preenche os poros das formações geológicas mais próximas da superfície que ficam parcialmente ocupados por água e por ar, recebendo esta zona a designação de zona vadosa (também conhecida por zona não-saturada, embora esse designação não esteja correcta na medida em que há períodos em que esta zona se encontra saturada).

Nielsen (1991), define a zona vadosa como "a área do terreno onde o conteúdo em água é geralmente menor que a porosidade do solo ou, de uma forma mais rigorosa, o local onde o potencial matricial ou a pressão da água são negativos, de uma ordem de magnitude inferior à da água livre no mesmo ponto, à mesma temperatura e composição iónica que a solução do solo". A espessura da zona vadosa pode variar de alguns centímetros a várias dezenas de metros e pode variar sazonalmente e de ano para ano em resposta a alterações da recarga proveniente da precipitação ou induzida pelo Homem (e.g. rega).

A zona vadosa é um sistema onde coexistem três fases: a sólida, a líquida e a gasosa. O movimento da água na zona vadosa é essencialmente vertical e lento, *i.e.* menos de 10 metros por ano e geralmente inferior a 1 metro por ano (Chapman, 1996). É um meio que se caracteriza pela heterogeneidade da sua textura e composição, o que lhe confere grandes instabilidades de escoamento e características ímpares para a retenção de poluentes, inibindo a sua lixiviação até à superfície freática.

A superfície piezométrica corresponde ao nível de transição entre a zona vadosa e a zona saturada subjacente onde os poros estão totalmente saturados por água. Neste ponto a pressão da água iguala a da atmosfera. É a este nível que se dá a descarga das águas subterrâneas para as massas de água superficiais de que são afluentes (Fig. 4). Esta situação é muito comum em Portugal onde o escoamento de base dos rios no Verão provém das águas subterrâneas.

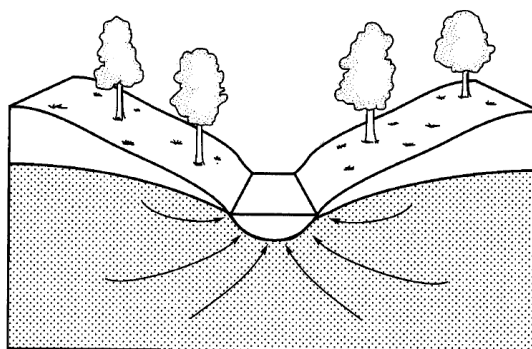


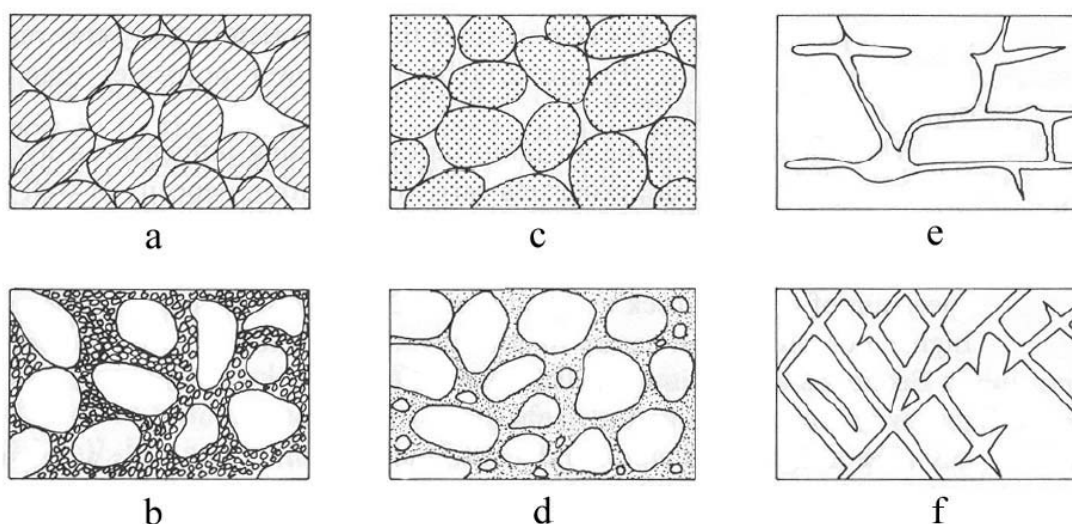
Fig. 4 - Representação esquemática da descarga de águas subterrâneas para um rio de que é afluente

A água existente abaixo do nível piezométrico é entendida como **água subterrânea**. As unidades geológicas compostas por formações capazes de armazenar e de transmitir água em condições economicamente aproveitáveis, designam-se por **aquífero**. Um **sistema aquífero** é um domínio espacial, limitado em superfície e em profundidade, no qual existem vários aquíferos, relacionados ou não entre si, mas que constitui uma unidade prática para a investigação ou exploração (Navarro *et al.*, 1989, in Almeida *et al.*, 2000).

### 3.3 Principais características de quantidade e de qualidade

#### 3.3.1 Meio subterrâneo

A matriz geológica por onde circulam as águas subterrâneas é habitualmente caracterizada em função da sua origem, considerando-se três tipos de formações: ígnea, sedimentar e metamórfica. Esta origem confere características físicas próprias a estas formações, dependendo da sua litologia e porosidade, que determinam o tipo de escoamento subterrâneo (Fig. 5): intergranular (poroso), cársico, fissurado, ou uma mistura entre eles. Define-se porosidade ( $\phi$ ) como a relação entre o volume de vazios ( $V_V$ ) e o volume total ( $V_T$ ). A porosidade intersticial, representada na Fig. 5 por a a d, é referida como porosidade primária, enquanto que a porosidade originada por dissolução ou fracturação, representada na Fig. 5 por e e f, é designada por porosidade secundária.



Legenda - **a**: Sedimento bem calibrado, com elevada porosidade; **b**: Sedimento mal calibrado, com baixa porosidade; **c**: Sedimento bem calibrado composto por elementos porosos, com muito elevada porosidade; **d**: Sedimento bem calibrado com porosidade reduzida por cimentação; **e**: Rocha tornada porosa por dissolução; **f**: Rocha tornada porosa por fracturação

Fig. 5 - Relação entre textura e porosidade (Meinzer, 1923 in Freeze e Cherry, 1979)

Os meios de porosidade primária, ou de aquíferos sedimentares, constituem os de maior importância regional e, no caso de Portugal Continental, são aqueles que ocupam maior área (60%) (PNA, 2001).

Conforme é possível observar na Fig. 5, há duas características de interesse para o escoamento subterrâneo e para a propagação de contaminantes: a porosidade e a conectividade entre os poros. A porosidade nas formações granulares depende não só da forma e da dimensão dos grãos, mas também da sua distribuição e da conectividade entre vazios, que por sua vez dependem da eventual compactação e cimentação dos poros. Para as formações rochosas, fracturadas e fissuradas, a porosidade depende das descontinuidades presentes e da sua interconectividade. Para que uma formação seja interessante do ponto de vista de exploração interessa que essas duas propriedades se aliem, uma vez que a elevada porosidade, p.e. de uma argila, só tem interesse caso a formação tenha capacidade de ceder essa mesma água. A facilidade de transmissão da água através de uma rocha ou sedimento denomina-se permeabilidade ou condutividade hidráulica.

Diversos autores apresentam tabelas que sintetizam as características de porosidade e da permeabilidade das principais formações hidrogeológicas em função do tipo de litologia, bem como algumas ilustrações da estrutura das formações (e.g. Freeze e Cherry, 1979 e Boulding, 1995). O Quadro 4 apresenta uma síntese de alguns desses valores.

Quadro 4 - Porosidade e condutividade hidráulica para diferentes formações geológicas (adaptado de Freeze e Cherry, 1979 e Boulding, 1995)

Material	Porosidade	Condutividade hidráulica (m/s)
<b>Sedimentos não consolidados</b>		
Cascalho	20-40	310 - 3,4
Areia grosseira	25-45	9 - 4,7x10 <sup>-4</sup>
Areia	25-50	
Silte	35-50	7,1x10 <sup>-1</sup> - 9,4x10 <sup>-7</sup>
Argila	35-70	1,4x10 <sup>-4</sup> - 1,4x10 <sup>-7</sup>
<b>Sedimentos consolidados</b>		
Arenito	5-30	1 - 3,7x10 <sup>-5</sup>
Siltito	20-40	1,4x10 <sup>-4</sup> - 9,4x10 <sup>-8</sup>
Calcário, dolomite	0-40	3,3x10 <sup>-4</sup> - 3,8x10 <sup>-7</sup>
Calcário cársico	5-50	2,6 - 1x10 <sup>-6</sup>
Xisto	0-10	
<b>Rochas cristalinas</b>		
Rochas cristalinas fracturadas	0-10	
Rochas cristalinas densas	0-5	
Basalto fracturado	5-50	

### 3.3.2 Escoamento subterrâneo

Os conhecimentos sobre o fluxo das águas subterrâneas necessários a uma gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, do ponto de vista da qualidade, devem ser analisados sob duas perspectivas: (1) a entrada de água no sistema subterrâneo através da **recarga** (que induz o aumento de água da zona saturada e pode constituir o processo de transporte de poluentes para o aquífero) e (2) o **escoamento na zona saturada** com a possibilidade de interacção, quantitativa e qualitativa, entre as águas subterrâneas e as águas superficiais.

Há vários modelos conceptuais que podem ser utilizados para o cálculo de **recarga** (Oliveira, 2004): (1) balanço hídrico sequencial diário; (2) descarga das águas subterrâneas para o meio hídrico superficial; (3) escoamento subterrâneo; (4) variação do armazenamento da zona saturada; (5) escoamento subterrâneo + variação do armazenamento da zona saturada; (6) descarga + variação do armazenamento da zona saturada; (7) os mesmos modelos considerando as intervenções humanas; (8) outros modelos, considerando por exemplo a posição do nível freático. Os dois primeiros têm sido mais utilizados, referindo-se os principais aspectos conceptuais subjacentes, com base em Lobo Ferreira *et al.* (2008).

O modelo de balanço hídrico sequencial diário caracteriza os diversos processos que ocorrem desde a precipitação até à infiltração profunda na base do solo. Este modelo considera a ocorrência de escoamento directo (água que não se infiltra no terreno), infiltração à superfície do solo, variação do armazenamento de água no solo e evapotranspiração pelas plantas de água armazenada no solo. Por balanço hídrico calcula os excedentes hídricos que constituem a infiltração profunda. Uma vez que o escoamento da zona vadosa é descendente, não se considerando outras saídas de água possíveis a não ser a recarga, a longo prazo (intervalo de tempo grande, por exemplo, para o período de um ano) a variação do armazenamento na zona vadosa é nula ou muito pequena, pelo que a infiltração profunda traduzir-se-á no processo de recarga, estando o atraso entre estes dois processos relacionado com as características hidráulicas do meio e com a distância da base do solo à zona saturada.

Lobo Ferreira (1981, 1982), desenvolveu o modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário, BALSEQ, largamente aplicado em Portugal. Mais recentemente, Oliveira (2003, 2004), fez uma actualização do modelo para introduzir novos métodos de resolução do balanço hídrico designando-o por BALSEQ\_MOD.

Nos casos em que coincidam os limites de uma bacia hidrogeológica e de uma bacia hidrográfica, e que dentro desses limites não haja armazenamento de água superficial, a evaporação de água superficial seja desprezável, e não haja captação de águas superficiais, a descarga constituirá o escoamento de base dos cursos de água. Este escoamento de base pode ser estimado através de técnicas de decomposição do escoamento superficial dos cursos de água. Esta técnica e sua aplicação a áreas de estudo em Portugal têm sido largamente divulgadas (Oliveira *et al.*, 1997a, 1997b; Oliveira, 2001, 2004), estando na origem o programa de computador DECHIDR\_VB.VBP.

Oliveira (2004, 2005) apresenta uma técnica de decomposição do hidrograma de escoamento superficial para calcular o escoamento de base de 13 bacias hidrográficas desenvolvidas parcial ou totalmente em maciços fracturados de Portugal. Em determinadas condições, que praticamente se verificaram nas bacias estudadas onde foram analisadas séries de 10 anos, e para quatro grupos litológicos distintos, a recarga de águas subterrâneas das bacias iguala o escoamento de base. O mesmo autor apresenta resultados da contribuição do escoamento de

base para o escoamento total que oscilam entre 14 e 68% para as bacias analisadas, dependendo das condições físicas das bacias, da capacidade de infiltração do solo, da hidrogeologia (armazenamento e transmissividade), da geomorfologia e do regime de precipitação. Finalmente, utilizando os valores médios do escoamento de base anual, propõe um modelo linear de regressão que relaciona o escoamento de base anual médio ( $F_b$ ) com a precipitação anual média ( $P$ ):  $F_b = 0,5210 * P - 284$  (mm/a).

O **escoamento das águas subterrâneas na zona saturada** é contínuo e lento, processando-se das áreas de recarga para as áreas de descarga (cf. Fig. 3). Este processo pode levar de alguns anos a centenas de anos, em função das características das formações hidrogeológicas e da distância percorrida, bem como das características climáticas da região. De uma forma geral, a velocidade do escoamento subterrâneo não ultrapassa alguns metros por dia, ou seja várias ordens de grandeza inferiores ao escoamento superficial em rios. Contudo, em algumas situações hidrogeológicas proporcionadas por formações cársticas e por tubos de lava, a excepcional porosidade que apresentam podem conduzir o escoamento com velocidades equivalentes ao escoamento superficial.

O escoamento das águas subterrâneas é descrito pela Lei de Darcy (válida para a maioria das situações hidrogeológicas) que refere que o caudal ( $Q$ ) é directamente proporcional ao gradiente hidráulico ( $i$ , a diferença entre a superfície piezométrica em quaisquer dois pontos dividida pela distância na horizontal entre eles), à permeabilidade das formações ( $K$ ) e à área atravessada ( $A$ ):

$$Q = -K i A$$

Uma das formas mais usuais de apresentar a Lei de Darcy é através da velocidade ou descarga específica ( $V$ ), em que o termo  $Q/A$  é substituído por  $V$  ficando:

$$V = -K \frac{dh}{dl}$$

O termo  $V$  refere-se à descarga específica uma vez que para determiná-la a área tida em conta ( $A$ ) inclui a matriz sólida e os poros. Na medida em que o escoamento apenas se processa pelos poros, a velocidade real das águas subterrâneas é superior à descarga específica e pode ser calculada através da divisão desta pela porosidade.

Existem diversas formas de processar as equações de escoamento e de transporte, tal como vem adiante referido na Secção 3.3.4.

### 3.3.3 Qualidade da água

A composição físico-química natural das águas resulta de um conjunto complexo de interações da água com a atmosfera, a litosfera e a biosfera que lhe confere características naturais próprias de um determinado contexto, independentemente de quaisquer influências antropogénicas.

As águas subterrâneas, pelo facto de estarem em estreita ligação com material geológico envolvente, contendo minerais solúveis, apresentam um conteúdo natural em sais dissolvidos superior ao das águas superficiais. As características químicas destas águas resultam, assim, das propriedades das formações geológicas e da forma como se processa a circulação da água no meio subterrâneo. A mineralização adquirida depende do período de contacto entre a água e o solo, dos processos de diluição e, ainda, dos equilíbrios das reacções físico-químicas gerados quer durante a infiltração na zona vadosa, quer posteriormente na zona saturada.

A qualidade natural das águas subterrâneas é geralmente definida através da fácies hidroquímica da formação hidrogeológica onde ela ocorre. A determinação da fácies hidroquímica resulta da proporção da concentração dos aniões e dos catiões principais nela presentes: sódio, cálcio, magnésio, potássio, cloreto, sulfato e bicarbonato. A Fig. 6 apresenta uma ilustração em diagrama de Piper da projecção das águas minerais engarrafadas da Europa e sua relação com o tipo de rocha mãe de onde provêm.

Em termos gerais, a composição química natural das águas subterrâneas apresenta um conjunto de elementos maiores, secundários e menores que lhe são inerentes. O Quadro 5 apresenta uma síntese da concentração relativa natural de elementos dissolvidos nas águas subterrâneas.



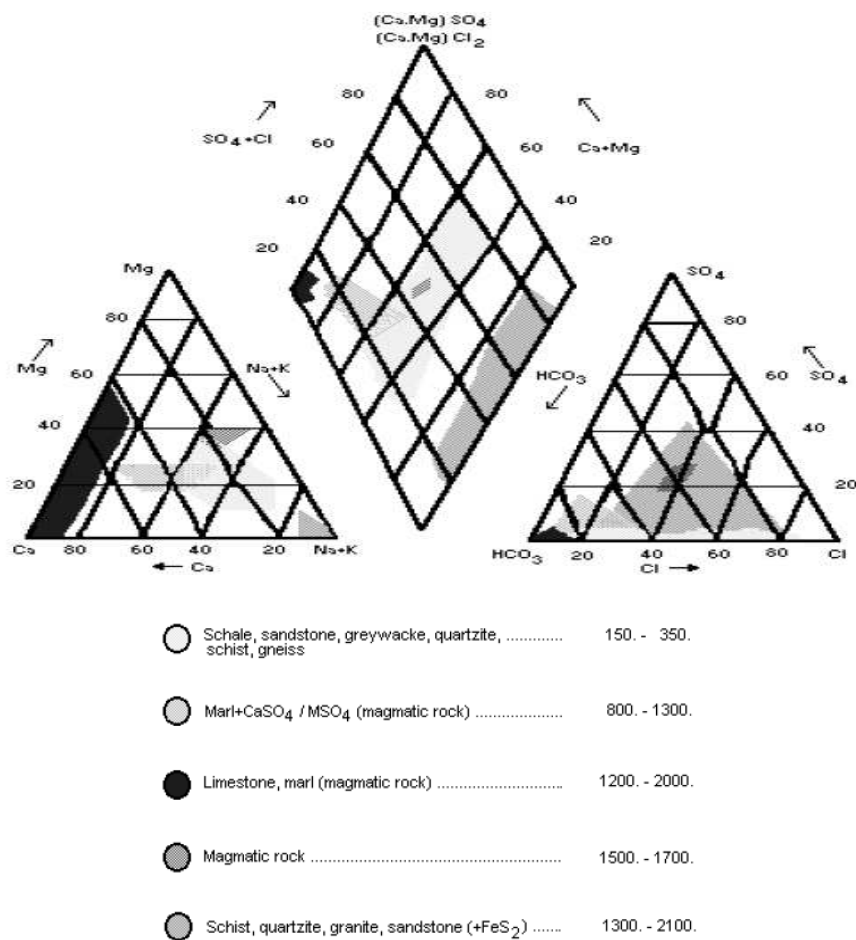


Fig. 6 - Diagrama de Piper com as águas minerais engarrafadas da Europa e sua relação com o tipo de rocha de onde foram extraídas (Zuurdeeg e Van der Weiden, 1985, *in* Bruno, 1997)

As características naturais apresentadas podem ser alteradas por actividades antropogénicas, sendo o grau e a extensão dos efeitos dessas alterações dependente dos contaminantes, da sua quantidade e da forma como são rejeitados, bem como das características do meio receptor.

As características do meio subterrâneo mais importantes para a definição da qualidade das águas subterrâneas podem ser sintetizadas em:

- ◆ características físicas: a textura, a porosidade e a condutividade hidráulica; este conjunto de características determina o regime de recarga, o tipo de escoamento subterrâneo e a superfície de contacto entre a água e o meio subterrâneo envolvente;
- ◆ características químicas e biológicas: composição mineralógica da matriz sólida, o pH, o potencial de oxidação/redução, a capacidade de troca catiónica, conteúdo em matéria orgânica e concentração em microrganismos.

Quadro 5 - Concentração relativa de elementos dissolvidos nas águas subterrâneas (adaptado de Todd, 1980, in Chapman, 1996)

<b>Elementos maiores</b> <b>(1 a 1000 mg/l)</b>	<b>Elementos secundários</b> <b>(0,01 a 10 mg/l)</b>	<b>Elementos menores</b> <b>(0,0001 a 0,1 mg/l)</b>
Sódio (< 200 mg/l)	Ferro	Arsénio
Cálcio (< 100 mg/l)	Alumínio	Bário
Magnésio (< 50 mg/l)	Potássio	Brómio
Bicarbonato (< 500 mg/l)	Carbonato	Cádmio
Sulfato (< 200 mg/l)	Nitrato	Crómio
Cloreto (< 1000 mg/l)	Fluoreto	Cobalto
Sílica (< 100 mg/l)	Boro	Cobre
	Selénio	Iodo
		Chumbo
		Lítio
		Manganés
		Níquel
		Fosfato
		Estrôncio
		Urânio
		Zinco

### 3.3.4 Modelação

A utilização de modelos numéricos de previsão do transporte de poluentes pelas águas subterrâneas tem sido uma realidade crescente, com a possibilidade oferecida por computadores cada vez mais potentes e sofisticados.

Os modelos matemáticos podem variar de modelos simplistas, nos casos em que apenas se pretenda obter-se uma estimativa aproximada da propagação de poluentes, a modelos sofisticados úteis para a previsão da velocidade e da propagação de poluentes.

Os modelos de transporte de poluentes exigem um grande número de informação abrangendo vários domínios relacionadas com a geografia, a geologia, a estratigrafia, a recarga de aquíferos, o uso e ocupação do solo, as cargas de poluentes, etc. A sua aplicação a uma determinada bacia exige um investimento inicial significativo relativamente à recolha de dados e à criação e manutenção de uma equipa investigação. Quando adequadamente aplicados, constituem uma ferramenta extremamente útil para a gestão integrada e sustentável da qualidade das águas subterrâneas.

Lobo Ferreira (1988) desenvolveu uma análise comparativa de modelos de transporte de massa para estudos de propagação de poluentes em águas subterrâneas, com base em diferentes métodos numéricos de soluções analíticas, método das características, random-walk e elementos finitos. Os testes incluíram ensaios a 1D e 2 D, com injeção constante e instantânea e poluentes conservativos e com decaimento de 1.<sup>a</sup> ordem. Como resultado desse

trabalho apresenta uma tabela comparativa com vários critérios de comparação e as conclusões para a selecção de códigos.

Década e meia depois, Diamantino, Lobo Ferreira e Novo (2005) apresentam uma análise detalhada destinada à selecção de modelos matemáticos de transporte de poluentes em águas subterrâneas, efectuada no âmbito do projecto MANPORIVERS, que contou com o LNEC como parceiro ([http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nas/estudos\\_id/manporivers](http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nas/estudos_id/manporivers)), e teve como principal objectivo a identificação das políticas eficazes e sustentáveis relativamente à gestão das águas superficiais e subterrâneas, tendo em conta as suas relações com a produção de alimentos e com a saúde humana.

O trabalho efectuado apresenta propostas referentes ao uso de modelos matemáticos de transporte de poluentes em águas subterrâneas e à escolha de modelos de transporte de poluentes em subterrâneas.

As principais conclusões desse estudo são as seguintes (Diamantino, Lobo Ferreira e Novo, 2005):

1. Os modelos de soluções analíticas (uni, bi e tri - dimensionais) podem ser utilizados para uma análise preliminar de transporte de massa em águas subterrâneas.
2. Os métodos baseados em diferenças finitas e método das características, uma vez compreendido o comportamento simplificado da situação hidrogeológica e do problema de transporte de massa, obtido com a solução analítica, são o tipo de modelo mais adequado para obter informação mais detalhada através da incorporação das condições hidrogeológicas distintas para os diferentes sectores do aquífero.
3. Os métodos de elementos finitos baseados em elementos quadrangulares ou triangulares permitem uma análise adicional mais precisa do problema, incluindo o tratamento mais detalhado das condições fronteira.
4. As situações com uma grande componente radial podem ser estudadas com o método de random-walk ou método das características. Este tipo de modelos é indicado para o estudo de situações fortemente convectivas com decaimento de poluentes no solo.

As condições de escoamento e de transporte e o tipo de poluentes (incluindo os grupos principais de poluentes e as reacções químicas relacionadas com a sua degradação, etc.) são simuladas por cada um dos 14 modelos analisados e são apresentadas em 4 tabelas reproduzidas em Anexo. Com base na informação dessas tabelas e no trabalho desenvolvido, Diamantino, Lobo Ferreira e Novo (2005) apresentam uma análise das condições preferenciais de aplicação de cada um dos modelos.

## **3.4 Interacção solo – águas subterrâneas – águas superficiais**

### **3.4.1 Considerações gerais**

A exploração dos aquíferos de uma forma sustentável implica que haja um equilíbrio, a longo prazo, na parte subterrânea do ciclo hidrológico entre as entradas e as saídas de água no sistema, *i.e.* entre a recarga (natural ou artificial) e as extracções (descargas naturais ou extracções).

Além dos aspectos naturais do ciclo hidrológico, referidos na Secção 3.2, a intervenção do homem traduz alterações que (Lobo Ferreira *et al.*, 2008): (1) pela prática da rega introduz água no solo; (2) pela construção de barragens cria formas de armazenamento superficial que podem induzir infiltração no terreno subjacente e evaporação; (3) pela rejeição de efluentes domésticos ou industriais, acrescenta água às zonas onde faz essa rejeição; (4) pela utilização de água proveniente de outros locais e a sua injeção na subsuperfície pode efectuar recarga artificial; e (5) pela extracção de água dos corpos hídricos superficiais ou subterrâneos causa diminuição das reservas.

A intervenção do Homem no ciclo hidrológico através da extracção de água para os mais diversos fins pode ter efeitos colaterais na quantidade e na qualidade das águas subterrâneas através da: 1) depleção de recursos a longo prazo; 2) indução de problemas de intrusão; 3) indução de problemas de qualidade; e 4) subsidência de terrenos. Nesse contexto, e atendendo à necessidade do uso sustentável (que permita servir as actuais necessidades sem comprometer futuras gerações de satisfazerem as suas), Todd (1959) introduz o conceito de *Safe yield* como o volume máximo de água extraível anualmente de um determinado aquífero por um período infinito sem causar qualquer efeito indesejável (tanto do ponto de vista de quantidade como de qualidade).

Neste Programa são analisadas de que forma é que as alterações de escoamento e do seu padrão podem afectar a qualidade das águas subterrâneas. Não são, portanto, analisados os aspectos de quantidade relativos à depleção de recursos a longo prazo e à subsidência de terrenos.

As alterações na qualidade das águas subterrâneas que podem comprometer a sua sustentabilidade podem ser induzidas pela (Alley *et al.*, 1999): 1) ligação ocupação do solo – águas subterrâneas e 2) ligação águas subterrâneas – águas superficiais.

### **3.4.2 Ocupação do solo – águas subterrâneas**

A principal intervenção do Homem na sustentabilidade da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos deve-se à forma como é feita a ocupação do solo para as diversas actividades antropogénicas. A possibilidade de movimento de fluidos da superfície do terreno para as

águas subterrâneas conduz a que a qualidade natural da água possa ser alterada, com diferentes efeitos consoante a origem e tipo de descarga e os contaminantes a ela associados.

As alterações nos padrões e na área de recarga que possam resultar de diferentes padrões de irrigação ou de processos de recarga artificial, entre outros, podem ter efeitos no aumento do transporte de contaminantes da superfície para as zonas mais profundas do solo.

As actividades antropogénicas actuais que mais contribuem para a contaminação dos solos e das águas subterrâneas são em seguida referidas.

O termo "contaminação" designa genericamente a alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio, como resultado da introdução no ambiente, pelo Homem, de substâncias ou energia capazes de causar prejuízos à saúde humana, aos recursos vivos, aos sistemas ecológicos, danos a estruturas ou quaisquer interferências com o uso legítimo do ambiente (FAO, 1979; Solanes, 1989 e Attewell, 1993).

As fontes de contaminação podem ser classificadas em dois tipos: pontual ou difusa. No primeiro caso a descarga é efectuada num único local identificável, como um colector (e.g. descarga de indústria). O local de descarga apresenta as concentrações mais elevadas e a partir desse ponto gera-se uma pluma que sofre dispersão no meio hídrico. A contaminação difusa ocorre de forma espacialmente dispersa à superfície do solo, sendo o arraste das substâncias contaminantes para o meio hídrico (lagos, albufeiras, rios, zonas costeiras ou águas subterrâneas) feita, de forma natural, pela água da precipitação, ou de forma induzida, pela actividade humana através da irrigação de culturas ou de zonas verdes. Algumas fontes de contaminação difusa são designadas de fontes (difusas) lineares em virtude da sua tipologia particular, como é o caso das estradas ou caminhos-de-ferro.

Em termos de repetição temporal das descargas, além das ocorrências habituais, designadas por permanentes ou crónicas, existem ainda as ocorrências acidentais. Alguns exemplos são descargas de excedentes de ETAR em tempo de chuva; descargas industriais acidentais por erros técnicos ou humanos, ocorrências inusitadas ou actos pontuais como lavagens de instalações e equipamentos (fontes pontuais). Outro tipo de exemplo são os acidentes rodoviários envolvendo derrame de substâncias perigosas (fonte difusa linear).

Os contaminantes apresentam-se sob a forma de efluentes líquidos e/ou de resíduos sólidos e têm uma grande diversidade. Podem ser classificados como físicos (matéria em suspensão, temperatura), químicos (orgânicos ou inorgânicos), bacteriológicos (microrganismos; bactérias) e radioactivos. No seio da água, estas substâncias podem ser transportadas na forma de sólidos ou partículas, na forma dissolvida ou ainda numa forma intermédia designada por coloidal.

O Quadro 6 apresenta uma súmula dos principais tipos de contaminantes químicos e

bacteriológicos resultantes de diferentes actividades contaminantes.

Quadro 6 - Súmula das características químicas das principais actividades contaminantes (adaptado e acrescentado a partir de WHO, 1987)

TIPO DE ACTIVIDADE	Sais	Nutrientes	Matéria orgânica	Hidro-carbonetos	Patogé-nicos	Metais Pesados	Orgânicos Sintéticos
<b>Actividade industrial</b>							
Ferro e aço	+	+	++	++	+	++	++
Metalurgia/Minas	+	+	+	+	+	+++	+++
Engenharia mecânica	+	+	+	+++	+	+++	++
Metais não ferrosos	+	+	+	+	+	+++	+
Minerais não metálicos	+++	+	+	+	+	+	+
Refinarias de gás e petróleo	+	++	+++	+++	+	+	++
Produtos plásticos	+++	+	++	++	+	+	+++
Produtos de borracha	++	+	++	+	+	+	++
Químicos orgânicos	++	+	++	+++	++	++	+++
Químicos inorgânicos	++	+	+	+	+	+++	+
Farmacêutica	+++	++	+++	+	++	+	+++
Madeira	++	+	++	+	+	+	++
Pasta e papel	+	++	++	+	+	+	++
Sabões e detergentes	++	+	++	++	++	+	+
Indústria têxtil	++	++	+++	+	+	+	++
Curtumes	+++	++	++	+	+	++	+++
Produtos alimentares	++	+++	+++	+	+++	+	+
Pesticidas	++	+	+	+	+	+	+++
Fertilizantes	+++	+++	+	++	+	+	++
Açúcares e álcool	+++	+++	+++	++	+	+	+
Energia eléctrica	+	+	+	+++	+	+++	++
Electrónica	+	+	+	+++	+	++	+++
<b>Actividade agrícola</b>							
<i>Cultivo de solo</i>							
com químicos agrícolas	+++	+++	+++	+	+++	+	+
com estrume ou águas residuais	+++	+++	+++		+++		
<i>Criação de gado</i>	+++	+++	+++		+++		
<b>Actividade urbana</b>							
	++	+++	+++	+	+++	+	+

+ Baixa; ++ Média; +++ Alta ⇒ Probabilidade dos efluentes conterem concentrações capazes de provocar contaminação

Os processos de transporte em águas subterrâneas podem ser agrupados nos seguintes três conjuntos:

- ◆ físicos: advecção, dispersão mecânica e difusão molecular;
- ◆ químicos: adsorção, troca iónica, precipitação/dissolução, hidrólise, reacções ácido-base, complexação iónica, oxidação/redução e decaimento radioactivo;
- ◆ biológicos: biodegradação.

Este conjunto de fenómenos pode assumir diversas escalas de importância, em função das características do meio onde se processam e dos poluentes presentes. São disso exemplo os fenómenos de dispersão que ocorrem em escalas muito diversas (de alguns metros a vários quilómetros) como resultado da heterogeneidade e anisotropia do meio (Bear, 1972; Fried, 1975; Lobo Ferreira, 1988 e Gambolati *et al.*, 1993). Também as reacções químicas e biológicas entre os poluentes e o meio envolvente são condicionadas pela razão entre a escala de tempo das reacções químicas e a velocidade de escoamento das águas subterrâneas, condicionando, assim, a existência ou não de equilíbrio.

No Quadro 7 apresenta-se uma síntese das propriedades do aquífero e dos poluentes capazes de afectar os processos físicos, químicos e biológicos e, assim, o transporte e comportamento dos poluentes no subsolo.

Quadro 7 - Propriedades do aquífero e dos poluentes capazes de afectar o transporte e comportamento dos poluentes no subsolo (adaptado de Knox *et al.*, 1993, in Leitão, 1997)

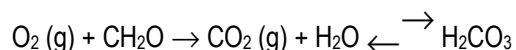
<b>Processos</b>	<b>Propriedades do meio subterrâneo</b>	<b>Propriedades dos poluentes</b>
<b>Físicos ou hidrodinâmicos</b>		
Advecção	Gradiente hidráulico, condutividade hidráulica, porosidade	Independente dos poluentes
Dispersão	Dispersividade, velocidade intersticial	Coefficiente de difusão
Difusão molecular	Velocidade intersticial	Coefficiente de difusão
<b>Químicos</b>		
Adsorção	Conteúdo em matéria orgânica, conteúdo em argilas, área de superfície específica	Solubilidade, coeficiente de partição octanol-água
Troca iónica	Capacidade de troca catiónica (CTC), força iónica, iões presentes, pH	Valência, momento dipolar
Precipitação/dissolução	pH, outros metais, pe, temperatura, conteúdo em matéria orgânica	Solubilidade, reacções de complexação
Hidrólise	pH, temperatura, outras reacções	Constantes de equilíbrio da reacção de hidrólise
Oxidação/redução	pe, pH	Constantes de equilíbrio da reacção redox
Decaimento radioactivo	Independente das propriedades do aquífero	Período de semi-vida
<b>Biológicos</b>		
Metabolismo/co-metabolismo	Microrganismos, nutrientes, pH, pe	Carência química e biológica de oxigénio, grau de halogenação, etc.

Outros aspectos relevantes no condicionamento, directo ou indirecto, do transporte de poluentes no subsolo, quer pela alteração do regime de escoamento quer pela alteração de condições químicas, etc., são o regime hidrológico e as condições climáticas da área, que determinam, em parte, o regime de recarga e o escoamento no subsolo.

O subsolo é um meio privilegiado de retenção de poluentes, inibindo a sua lixiviação até à superfície freática. É um sistema dinâmico com características ímpares e em constante modificação centralizando a maioria das trocas gasosas entre o subsolo e a atmosfera, essencialmente resultado da retenção/evapotranspiração pelas plantas em presença, e é também um meio sujeito a fortes flutuações hídricas como resultado da relação entre a precipitação e a evaporação. Estas flutuações, com constantes trocas gasosas e hídricas, tornam o solo num meio sujeito a fortes alterações de pH, de condições de oxidação-redução e consequentemente de alterações biológicas e químicas que o tornam um meio muito complexo.

O solo tem a capacidade de gerar quantidades apreciáveis de ácidos e de consumir o oxigénio disponível na água que se infiltra, acelerando a taxa de decomposição dos poluentes orgânicos (Alloway, 1993b). O ácido mais importante que se produz é o ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ), através do decaimento da matéria orgânica ( $CH_2O$ ) existente e do consumo de oxigénio ( $O_2$ ), segundo

a seguinte reacção química:



De uma forma genérica e simplista, o resultado da acção do solo na retenção da poluição da água, em termos de condições químicas, físicas e biológicas médias, pode ser resumido nos seguintes termos:

- ◆ redução generalizada da poluição;
- ◆ diminuição do conteúdo em oxigénio dissolvido na água;
- ◆ diminuição do conteúdo em matéria orgânica;
- ◆ geração de ácidos, dos quais se destaca, entre os mais importantes, o  $\text{H}_2\text{CO}_3$ .

A maioria dos processos que estão na origem da eliminação ou de atenuação da poluição ocorrem, numa proporção claramente superior, no solo (Fig. 7). As principais propriedades do solo que condicionam o desencadear das reacções referidas e que afectam o movimento de poluentes no solo são (Alloway, 1993a): o pH, o potencial de oxidação-redução, o conteúdo em matéria orgânica, a população bacteriana e os minerais de argila presentes.

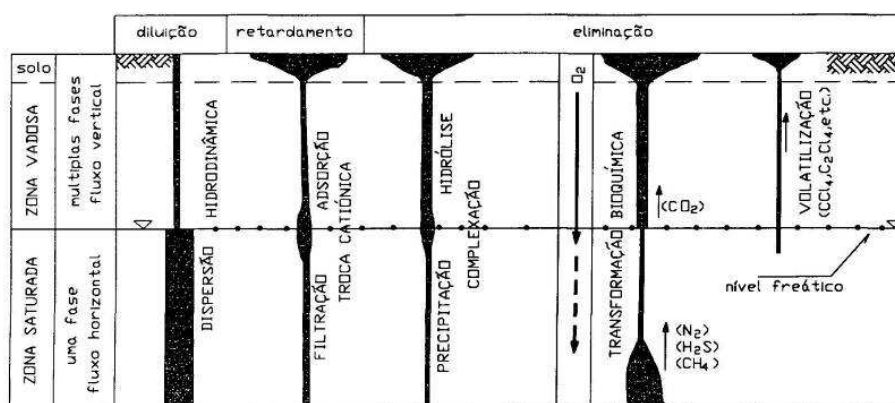


Fig. 7 - Representação esquemática dos processos de atenuação da poluição em águas subterrâneas (WHO, 1987, in Leitão, 1997)

Este conjunto de propriedades permitem o desenvolvimento de diversos processos de adsorção, troca cationica, precipitação, transformação bioquímica, etc., que são responsáveis, em última análise, pelo retardamento ou eliminação de compostos na zona vadosa (cf. Fig. 7).

A atenuação de poluentes na zona vadosa, e no subsolo em geral, não apresenta a mesma eficácia em todos os ambientes hidrogeológicos. A retenção de poluentes é mais pronunciada em rochas não consolidadas, sendo a actividade muito inferior para o caso de formações rochosas consolidadas. Dentro dos sedimentos não consolidados, são as formações compostas por sedimentos mais finos (com uma forte componente argilosa), as que apresentam uma maior capacidade de interacção química e biológica com o meio envolvente.



Dentro das formações não consolidadas, os aquíferos livres arenosos que apresentam uma elevada superfície freática são aqueles onde se faz sentir menos a acção de protecção do solo, como resultado de uma lixiviação mais facilitada.

A zona vadosa, pela sua localização física entre os principais focos de poluição e as águas subterrâneas, tem o estatuto de meio condutor de diversos compostos na fase líquida ou gasosa, mas paralelamente também de local preferencial, e com natural aptidão, para a degradação e transformação de poluentes, favorável portanto à sua atenuação ou mesmo eliminação. A zona vadosa actua, então, como uma zona tampão de protecção contra a poluição de águas subterrâneas. Esta zona representa a primeira e mais importante defesa natural contra a poluição das águas subterrâneas.

Em síntese, a zona vadosa desempenha um papel fundamental na atenuação da poluição, através do seguinte conjunto de processos principais (WHO, 1987):

- ◆ intercepção, adsorção e eliminação de bactérias patogénicas e vírus;
- ◆ atenuação de metais pesados e outros químicos inorgânicos, através de fenómenos de precipitação (como carbonatos, sulfuretos ou hidróxidos), de adsorção, de troca iónica e de complexação;
- ◆ adsorção ou biodegradação de hidrocarbonetos e de compostos orgânicos sintéticos.

Uma vez atingida a zona saturada, a qualidade da água é fortemente influenciada pela falta de contacto directo com a atmosfera, inviabilizando a reposição de todo o oxigénio que é consumido nas reacções hidroquímicas e bioquímicas.

Um aspecto que é possível observar na evolução hidroquímica das águas desde que entram no subsolo e à medida que se deslocam no seu percurso, é um aumento generalizado no total de sólidos dissolvidos presentes, verificando-se igualmente a progressiva aquisição da maioria dos iões maiores na água (Freeze e Cherry, 1979). As águas subterrâneas que circulam a maiores profundidades e em formações de mais baixa permeabilidade têm maior conteúdo em sólidos dissolvidos que as águas que circulam mais próximo da superfície. Este facto deve-se ao maior tempo de contacto da água com as formações envolventes e, assim à maior oportunidade para se processarem intercâmbios químicos com a água circulante (Custodio e Llamas, 1976).

### **3.4.3 Águas superficiais – águas subterrâneas**

A relação águas superficiais – águas subterrâneas foi já analisada na Secção 3.2 no âmbito do ciclo hidrológico. As trocas de água entre estes dois meios permite que possa haver transporte de contaminantes de um meio para o outro.

As alterações dos caudais de águas subterrâneas extraídos podem ter como consequência alterações na qualidade das águas superficiais de jusante para onde drenem e ecossistemas

associados. O oposto pode acontecer no caso de haver alimentação das águas subterrâneas através das águas subterrâneas, situação que em Portugal ocorre essencialmente por extracções de águas subterrâneas junto a rios. Nesse contexto pode haver introdução de contaminantes provenientes do fluxo de baixa qualidade induzido pelas novas condições de equilíbrio de cargas hidráulicas.

A intrusão salina é o processo mais importante nas zonas costeiras. No contacto do meio terrestre com o oceano há uma zona de mistura entre a água doce (do meio terrestre) com a água salgada (do oceano). Nesta zona há um equilíbrio dinâmico entre estas massas de água de diferentes salinidades e densidades, estando a cunha salina sob as águas doces. Quando há exploração de águas subterrâneas em zonas costeiras (na parte terrestre), este equilíbrio é perturbado. A exploração provoca um cone de rebaixamento que, se atinge a linha de costa, provoca o escoamento de água salgada em direcção à captação, dando-se o processo de intrusão marinha.

A intrusão marinha com águas com características hidroquímicas diferentes pode alterar as próprias características do aquífero, como por exemplo a alteração da sua porosidade e permeabilidade por interacções água-matriz sólida (Morris *et al.*, 2003).

### 3.5 Metodologia DPSIR

Na sequência do exposto ao longo das secções anteriores deste capítulo, torna-se evidente que a gestão integrada e sustentável da qualidade das águas subterrâneas só é possível através do planeamento e da gestão deste recurso de forma holística, ao nível da bacia hidrográfica, e num contexto que atenda aos efeitos que diferentes actividades económicas, sociais e ecológicas, existentes e planeadas, possam ter no uso e na qualidade das águas.

Esta interligação entre diferentes actores, utilizadores e processos nem sempre é fácil de articular. A Agência Europeia do Ambiente (AEA) propôs um modelo conceptual com o objectivo de descrever as interacções entre a sociedade e o ambiente a que denominou DPSIR. DPSIR é a sigla que designa a sequência *Driving Force* (Força Motriz) - *Pressure* (Pressão) - *State* (Estado) - *Impact* (Impacte) - *Response* (Resposta) (Fig. 8). Este modelo foi inicialmente proposto pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE, 1993) com a designação de PSR e posteriormente modificado e adaptado por diversas organizações.

A metodologia DPSIR, originalmente utilizada em estudos de âmbito social, passou a ser igualmente utilizada na sistematização de indicadores ambientais e, mais tarde, no âmbito do desenvolvimento sustentável, apresentando a grande vantagem de permitir associar indicadores de domínios distintos, nomeadamente do domínio social, económico, ambiental e institucional. É, pelos vários motivos atrás referidos, utilizada ao longo deste Programa, quer na

componente de análise do estado da arte quer depois no Programa de Estudos apresentado no Capítulo 10. Apresenta-se uma breve descrição do contexto em que é utilizada esta metodologia.

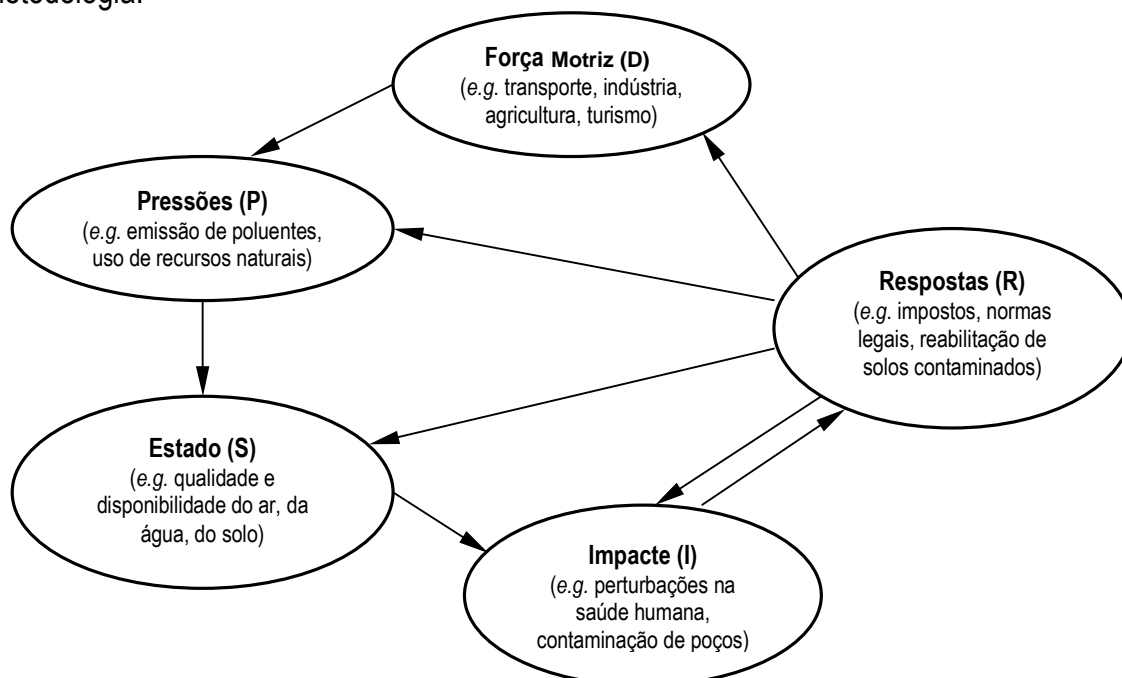


Fig. 8 - Estrutura conceitual do modelo DPSIR

Os indicadores de forças motrizes (D) descrevem o desenvolvimento social, demográfico e económico das sociedades e as correspondentes mudanças nos modos de vida e nos padrões de consumo e de produção. As principais forças motrizes são o crescimento da população e as mudanças nas necessidades e actividades económicas dos indivíduos que, por sua vez, implicam mudanças ao nível da produção e do consumo. É através destas mudanças que as forças motrizes exercem pressões no ambiente que se podem manifestar de diferentes modos.

Os indicadores de pressão (P) fornecem informação relativamente às emissões de contaminantes, às aplicações de agentes químicos e biológicos e ao uso do solo e de outros recursos.

Os indicadores de estado (S) fornecem uma descrição sobre a qualidade do ambiente num determinado horizonte espaço/tempo. Os diferentes compartimentos ambientais (ar, água, solo, habitats, espécies) são afectados pelas pressões exercidas, induzindo impactes ambientais nos ecossistemas, e eventualmente na saúde humana, assim como no bem estar económico e social da sociedade.

Os indicadores de impacte (I) são utilizados para descrever as consequências da mudança de estado do ambiente nos outros factores.

Por último, os indicadores de resposta (R) referem-se a respostas do governo, instituições e/ou

grupos de indivíduos perante impactes indesejáveis no ambiente, de modo a prevenir, mitigar, melhorar ou adaptar às mudanças do estado do ambiente. Estas respostas devem ter por base o conhecimento científico de causa-efeito entre as pressões, estado e impacte. As respostas podem tentar mudar e/ou redireccionar as principais tendências do consumo e produção de bens e serviços, melhorar a monitorização e controlo de contaminantes, ou desenvolver tecnologias menos contaminantes.

Como se pode verificar, o modelo conceptual DPSIR permite descrever as relações entre as origens e as consequências dos problemas ambientais, facilitando a sistematização dos indicadores seleccionados perante determinada aplicação e consoante os objectivos em causa.

### **3.6 Indicadores de sustentabilidade**

A análise de diferentes situações e das suas alterações face a novos cenários induzidos por determinadas pressões, por exemplo através da aplicação da metodologia DPSIR, implica a utilização de critérios de análise objectivos e comparáveis que possam servir de indicadores.

Define-se indicador como "um dado estatístico ou uma medida que facilita a interpretação e análise de uma condição ou elemento do mundo ou da sociedade em relação a um padrão ou um objectivo" (USEPA, 1995). Os indicadores não são mais que parâmetros (*i.e.* propriedade mensurável ou observável) que, isoladamente ou combinados entre si, permitem reflectir determinadas condições de um sistema em análise.

Os indicadores ajudam a simplificar, a quantificar e a transmitir uma ideia complexa de uma forma compreensível. Permitem observar, descrever e avaliar o estado actual, comparando-o com outras situações, permitindo relacionar o actual estado com uma situação de referência ou um estado desejável. Estes números, simples, descritivos ou normativos, podem condensar a enorme complexidade do mundo que nos rodeia num conjunto de informação com significado, e passível de ser gerida.

Os indicadores permitem avaliar o progresso de todo um sistema face a uma determinada acção e aos objectivos e exigências de legislação estabelecidas, permitindo facilitar a adesão, também financeira, dos actores implicados. Quando ligados a modelos, os indicadores podem servir para avaliar cenários alternativos que mais vão de encontro a um determinado estado desejável de protecção ambiental. Os indicadores servem, portanto, para transmitir informação sobre um sistema ou sobre os seus processos.

O vasto conjunto de dados disponível na gestão dos recursos hídricos e a crescente complexidade dos problemas de gestão, onde as temáticas da economia, ecologia, sociedade civil e recursos se entrecruzam, tornam os indicadores como verdadeiros instrumentos de comunicação entre actores (*stakeholders*), políticos, gestores, cientistas e o público que devem

ser utilizados para gerir e sistematizar informação promovendo informação útil para os processos de decisão (Agência Europeia do Ambiente da Dinamarca).

O critério dominante subjacente à especificação de um indicador é o conhecimento e a apreciação científicos (WWDR, 2003). O fornecimento de informação relativa às forças motrizes, impactes e respostas políticas, constitui uma estratégia para fortalecer o apoio do público nas medidas políticas e para a sensibilização pública face às questões ambientais.

Os indicadores podem servir de base à construção de índices, recorrendo-se para isso a métodos de agregação de indicadores e obtendo-se um valor final como resultado. No entanto, ao ser seleccionado um indicador ou construído um índice com o objectivo de se ganhar clareza e operacionalidade, acaba por se perder algum detalhe da informação, e é por esta razão que os sistemas de indicadores e índices não foram ainda adoptados de forma generalizada (Gomes *et al.*, 2000).

Assim, a selecção dos indicadores deve obedecer, o mais possível, a um conjunto de critérios. Na prática, é difícil desenvolver indicadores que preencham todos os critérios, devendo por isso privilegiar-se os mais relevantes para a situação a que se destinam os indicadores. Algumas das características que os indicadores deverão apresentar, e que devem ser tidas em consideração durante a sua selecção, são as seguintes (Gomes *et al.*, 2000; Barbosa e Silva, 2001):

- ◆ devem ser simples e de fácil interpretação;
- ◆ devem ser representativos;
- ◆ devem revelar evolução ao longo do tempo;
- ◆ devem basear-se em informação disponível ou de baixo custo;
- ◆ devem ser de fácil e regular actualização;
- ◆ devem ser comparáveis com critérios legais ou com outros padrões/metapas existentes;
- ◆ devem revelar antecipadamente evoluções irreversíveis;
- ◆ devem ser em número limitado;
- ◆ devem permitir a sua utilização na produção de um índice;
- ◆ devem ser acessíveis a diversos potenciais utilizadores.

Vrba e Lipponen (2007) propõem um conjunto de 10 indicadores de sustentabilidade para as águas subterrâneas, de aplicação global, nacional ou a nível de sistema aquífero que foram integrados no WWDR 2 (2006) (cf. Quadro 8). Apresentam informação específica sobre a forma de definir o indicador, a sua relação com a metodologia DPSIR (cf. Secção 3.5), parâmetros necessários, unidades de medida e métodos para a sua computação e interpretação, escala de aplicação e ligação entre os indicadores. Dado o interesse desta informação, refere-se neste documento essa lista de indicadores, embora apenas sejam aprofundados os mais directamente ligados às questões de qualidade.

Quadro 8 - Indicadores de sustentabilidade de águas subterrâneas propostos pelo WWDR 2 (cf. Vrba e Lipponen, 2007)

Designação	Posição DPSIR	Definição
Águas subterrâneas <b>renováveis</b> per capita	Força motriz	Quantidade total de águas subterrâneas per capita a nível nacional, regional ou natural (aquífero, bacia) (expressa em m <sup>3</sup> /ano)
<b>Extracções totais</b> de águas subterrâneas / <b>recarga</b>	Estado	Extracções totais de águas subterrâneas x 100%/ recarga total de águas subterrâneas (expressa em %)
<b>Extracções totais</b> de águas subterrâneas /águas subterrâneas <b>exploráveis</b>	Estado	Extracções totais de águas subterrâneas x 100%/ águas subterrâneas exploráveis total (expressa em %)
<b>Percentagem</b> de águas subterrâneas no total de água utilizada para <b>consumo</b> humano	Estado	Quantidade de águas subterrâneas (km <sup>3</sup> /ano) / total de água utilizada para consumo humano (km <sup>3</sup> /ano) (expressa em %)
<b>Depleção</b> de águas subterrâneas	Estado - Impacte	Σ áreas com problemas de depleção de águas subterrâneas x 100% / Σ área do aquífero estudado (expressa em %)
Total de águas subterrâneas <b>não renováveis</b> exploráveis / <b>extracção anual</b> de águas subterrâneas não renováveis	Estado - Impacte	Total de águas subterrâneas não renováveis exploráveis (km <sup>3</sup> ) /extracção anual de águas subterrâneas não renováveis (km <sup>3</sup> /a)
<b>Vulnerabilidade</b> de águas subterrâneas	Estado - Pressão	O termo vulnerabilidade natural (ou intrínseca) é definido apenas em função dos factores hidrogeológicos – as características do aquífero, os materiais geológicos da zona vadosa e o solo (adimensional)
<b>Qualidade</b> das águas subterrâneas	Estado - Impacte	<ul style="list-style-type: none"> <li>o a) Para problemas de contaminação natural: Σ área do aquífero com problemas de contaminação natural x 100% / Σ área do aquífero estudado (expressa em %)</li> <li>o b) Para problemas de contaminação antropogénica associados a poluição difusa: Σ área do aquífero com incremento de concentração de um determinado parâmetro x 100% / Σ área do aquífero estudado (expressa em %)</li> </ul>
<b>Adequação</b> das águas subterrâneas à <b>produção</b> de água destinada a distribuição	Estado e Resposta	Adequação das águas subterrâneas ao tratamento necessário à produção de água destinada a distribuição
<b>Dependência</b> da população <b>agrícola</b> das águas subterrâneas	Força motriz	A proporção da população total de um país que utiliza as águas subterrâneas para aumentar a produtividade da agricultura ou pecuária

Os indicadores de qualidade das águas subterrâneas acima mencionados permitem avaliar o estado actual, bem como as tendências de alteração através de várias medições no espaço e no tempo. Estes indicadores ajudam a identificar e a prever alterações resultantes de novas pressões que possam conduzir à contaminação de águas subterrâneas.

A Directiva das Águas Subterrâneas (DAS), relativa à protecção das águas subterrâneas contra a contaminação e a deterioração, propõe a adopção de medidas de prevenção e de controlo da contaminação das águas subterrâneas, incluindo critérios para a avaliação do seu bom estado químico e critérios para a identificação de tendências significativas e persistentes para o aumento das concentrações de contaminantes. Aponta, juntamente com a DQA, um conjunto de substâncias (indicadores) que podem impedir que o estado de qualidade das águas atinja o Bom estado. Entre elas incluem-se:

- ◆ Substâncias referidas nos Anexos I e II da Directiva das Águas Subterrâneas;
- ◆ Lista de substâncias prioritárias (Decisão n.º 2455/2001/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 20 de Novembro de 2001, que estabelece a lista das substâncias prioritárias no domínio da política da água e altera a Directiva 2000/60/CE);
- ◆ Contaminantes emergentes (principalmente carcinogénicos e disruptores endócrinos).

O Quadro 2 apresenta uma síntese da lista de contaminantes.

Importa que a forma como se processa a monitorização de parâmetros indicadores permita recolher informação com significado e representativa das condições à escala que se pretende analisar. Na Secção 3.7 apresentam-se alguns aspectos a atender para evitar a utilização errónea da qualidade das águas subterrâneas sem atender às condições naturais de qualidade.

Para a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos do ponto de vista qualitativo, importa definir um conjunto de respostas adequadas, com programas e medidas, efectuadas com base no entendimento das relações entre causas e efeitos, conhecendo as respostas do meio a alterações das forças motrizes e das pressões de diferentes actividades sobre o mesmo. Juntas determinam o impacte que esse estado pode causar, como por exemplo na saúde pública ou nos ecossistemas.

### **3.7 Monitorização de águas subterrâneas**

#### **3.7.1 Aspectos gerais da monitorização físico-química**

A correcta monitorização e análise dos indicadores qualitativos das águas subterrâneas são um aspecto-chave para o correcto conhecimento das condições de qualidade das águas e para a efectiva protecção dos recursos hídricos subterrâneos. A falta conhecimento científico conduz a uma inoperância com consequências evidentes para a gestão e o uso sustentável do recurso.

A obtenção de que resultados adequados depende da forma como é efectuada a amostragem: locais de amostragem, profundidade dos ralos, tempo de purga, método de amostragem, etc. Procedimentos diferentes podem conduzir a resultados muito diferentes. Lee e Jones (1983) apresentam uma síntese dos aspectos principais a atender na amostragem de águas subterrâneas. Leitão (1997) apresenta os principais aspectos relacionados com o planeamento de redes de monitorização, com a selecção e a instalação dos furos de monitorização, com a identificação do tipo de poluentes presentes e com a sua importância no planeamento da monitorização. Apresenta-se, também, os processos gerais de monitorização e de amostragem de águas subterrâneas, incluindo algumas considerações sobre a frequência de amostragem e os parâmetros a analisar. Apresenta-se uma breve síntese de alguns aspectos fundamentais a atender para uma monitorização adequada.

A monitorização da qualidade das águas subterrâneas é geralmente efectuada tendo em vista:

(1) a caracterização da situação natural ou de referência (visando a sua gestão da forma mais adequada e a tomada de iniciativas contra eventuais alterações significativas da sua qualidade) e (2) a caracterização de eventuais efeitos da poluição, o seu grau e a sua extensão (referida na DQA como monitorização de vigilância e operacional).

De acordo com a DQA, uma rede de monitorização de águas subterrâneas deverá ser "concebida de modo a proporcionar uma panorâmica coerente e completa do estado químico das águas subterrâneas ..., bem como permitir detectar a presença de tendências a longo prazo, antropogenicamente induzidas, para o aumento das concentrações de poluentes".

Uma rede de monitorização de águas subterrâneas (cujos dados podem servir de indicadores de qualidade) deve, assim, ser composta por furos correctamente localizados e em número suficiente para que, no seu conjunto, constituam as infra-estruturas básicas para a monitorização representativa das variáveis hidrodinâmicas do aquífero e da qualidade da água, no espaço e no tempo.

Não obstante, acontece que em muitas situações não é concebida uma rede específica para determinado fim, mas são sim utilizadas infra-estruturas pré-existentes que nem sempre são adequadas. Os problemas mais comuns encontrados na utilização de infra-estruturas existentes devem-se à localização nem sempre ser a mais ajustada à definição dos contornos de uma determinada contaminação; à posição de entrada de água nos ralos não ser a profundidades compatíveis com a contaminação (frequentemente são demasiado profundos); ao material do furo poder interferir com a qualidade da amostragem; ou à técnica de construção e manutenção dos furos ser deficiente causando contaminação localizada que não representa a situação geral do aquífero; e a extracção de água em mais do que um estrato aquífero.

Os furos, já existentes ou novos furos a instalar, devem permitir amostrar a qualidade da água original, *i.e.* não afectada pela eventual poluição - furos a montante - e permitir recolher a água subterrânea em áreas de jusante dos caminhos preferenciais de circulação de águas subterrâneas - furos a jusante (EPA, 1978). A sua localização e a profundidade devem ser definidos para cada caso, com base nas características hidrogeológicas do local.

O próprio processo de amostragem condiciona sobremaneira os resultados a obter. O tempo de purga antes da amostragem é um dos aspectos fundamentais a atender quando se pretende obter uma amostra representativa (devem ser efectuada após a estabilização do pH, condutividade eléctrica e temperatura).

Por outro lado, importa ter em consideração o tipo de contaminantes presente na definição de estratégias de amostragem e no processo de colheita de amostras de águas subterrâneas, de forma a ser adaptada ao tipo e à configuração da mancha de poluição e às suas propriedades hidroquímicas. Por exemplo, de entre os elementos solúveis, ou parcialmente solúveis, os elementos que têm densidades diferentes das da água, apresentam uma migração, no subsolo,



distinta da da água, aspecto que deverá ser tomado em consideração na sua amostragem, com utilização de furos com ralos abertos às profundidades onde é expectável encontrar os contaminantes.

Há, ainda, que ter em conta que as amostras de águas subterrâneas em contacto com o ar podem ficar sujeitas a uma série de processos como sejam: libertação de gases, oxidação em presença de ar, adsorção, desadsorção e troca iónica induzida por variação de temperatura e pH, presença de microrganismos, etc. Estas são algumas das reacções mais frequentes que podem alterar a composição das amostras, logo após a sua colheita. É necessário tê-las em conta, de forma a serem minimizados erros, através de condições específicas de colheita e de conservação de amostras.

### 3.7.2 Utilização de isótopos ambientais

Os isótopos ambientais, estáveis ou radioactivos, envolvidos no ciclo hidrológico, têm vindo a ser utilizados nas últimas décadas como traçadores naturais em estudos de águas subterrâneas (Fig. 9), como complemento às análises químicas, sendo excelentes auxiliares na compreensão da dinâmica da qualidade das águas subterrâneas. Os processos físicos e os fenómenos meteorológicos responsáveis pelo transporte de água nas diferentes fases do ciclo hidrológico produzem uma caracterização isotópica da mesma, que pode ser aproveitada para obter conclusões sobre a sua origem, idade e comportamento (Adar *et al.*, 1998; Lambán *et al.*, 1999; Jorgensen *et al.*, 2001; AEIO, 2003; Dapeña *et al.*, 2004; Morell *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2006; Rodriguez-Arévalo *et al.*, 2007).

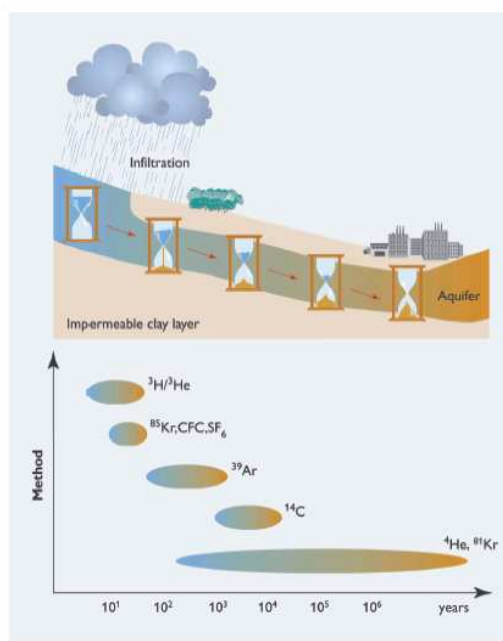


Fig. 9 - Datação da água ao longo de uma linha de fluxo no aquífero e os traçadores ambientais mais comuns utilizados na datação de águas subterrâneas (Kirsch *et al.*, 2006)

Destacam-se, entre isótopos mais utilizados em hidrologia, os seguintes: (1) isótopos estáveis: deutério ( $^2\text{H}$ ) e oxigénio ( $^{18}\text{O}$ ) e (2) isótopos radioactivos: trítio ( $^3\text{H}$ ) e carbono ( $^{14}\text{C}$ ).

O  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$  e o  $^{18}\text{O}$  são constituintes da molécula de água, pelo que têm sido definidos como traçadores perfeitos no estudo do ciclo hidrológico, complementando a informação dada pelos elementos maiores quanto à origem e mistura de águas. A sua detecção baseia-se nos diferentes graus de fraccionamento isotópico apresentado pelos átomos de oxigénio e de hidrogénio das moléculas de água durante os processos de evaporação e de formação de nuvens, resultantes de massas de ar formadas sobre diferentes regiões dos oceanos, com humidade e temperatura diferentes. A formação de nuvens apresenta, por isso, uma codificação isotópica diferente, segundo a sua origem e a época do ano.

Usados em conjunto, os isótopos de hidrogénio e oxigénio fornecem informação útil sobre a identificação da cota topográfica da zona de recarga dos aquíferos e sobre a evolução geoquímica dos constituintes dissolvidos na água. O deutério determina a origem e a história da água e o trítio determina tempos de residência.

A utilização das espécies isotópicas estáveis faz-se sob a forma de diferenças relativas, ou seja, a partir da razão entre a espécie isotópica mais pesada e a espécie isotópica mais leve e mais abundante, comparada relativamente a um padrão específico e expressa em notação  $\delta$  (Fernandes *et al.*, 2007). O valor  $\delta$  é adimensional, expresso em permilagem ‰ e dado pela equação:

$$\delta \text{ (‰)} = [(R_{\text{amostra}}/R_{\text{padrão}}) - 1] \times 1000$$

onde:

$R_{\text{amostra}}$  representa  $^2\text{H}/\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$

$R_{\text{padrão}}$  refere-se à mesma razão determinada no padrão

Os resultados isotópicos de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  determinados em amostras de água são expressos relativamente ao padrão internacional V-SMOW, que fixa, por convenção, o zero da escala  $\delta^{18}\text{O}$  e da  $\delta^2\text{H}$ . O V-SMOW reflecte uma mistura de águas com a composição isotópica média da água de vários oceanos (*i.e.* cerca de 97% da água existente na hidrosfera e que, na sua globalidade, tem uma composição isotópica aproximadamente uniforme), que constitui o início e o fim do ciclo hidrológico.

Os isótopos ambientais radioactivos permitem o cálculo da idade aparente da água sendo os mais usuais: o trítio ( $^3\text{H}$ ) e o carbono ( $^{14}\text{C}$ ).

A presença de trítio na atmosfera até 1950 era exclusivamente de origem natural, *i.e.* de procedência cósmica. A partir das primeiras explosões nucleares (a partir do ano de 1952 e, sobretudo, nos anos 1961 e 1962 quando se realizaram o maior número de detonações nucleares atmosféricas), registou-se um aumento considerável da concentração de trítio na

água da precipitação de aproximadamente 1 000 vezes superior relativamente ao valor de referência.

Note-se que existe uma grande diferença entre a concentração de trítio no hemisfério norte e o hemisfério sul devido ao facto da maioria das explosões nucleares se terem realizado no hemisfério norte. Além disso, existem numerosos factores que influem na quantidade de trítio que pode encontrar-se num lugar ou noutro. Entre esses factores destacam-se principalmente a situação geográfica, a latitude, o efeito de continentalidade e o efeito de diluição. Pode considerar-se que o maior conteúdo em trítio existe nas zonas que estão a maior altitude e nas mais afastadas do equador e do mar. A concentração em trítio pode também ser afectada por variações sazonais, mensais e anuais dependentes das condições climáticas. Nas ilhas oceânicas existe um importante efeito de diluição por vapor marinho, pobre em trítio.

O trítio ( $^3\text{H}$ ) é um isótopo do hidrogénio com um período de semi-vida de 12,3 anos (Freeze e Cherry, 1979). A concentração em trítio em águas naturais é usualmente expressa em Unidades de Trítio (TU). Uma TU corresponde a  $^3\text{H}/^1\text{H} = 10^{-18}$ , o que corresponde a 7,2 dpm (desintegrações por minuto) por litro de água, ou seja, 0,12 Bq/l (PAYNE, 1983, in Fernandes *et al.*, 2007).

A presença de trítio nas águas subterrâneas interpreta-se como um indicador claro de recarga recente. A sua ausência indica tempos de residência superiores a 50 anos. Em alguns casos a sua presença indica uma mistura de águas subterrâneas. Por isso, utiliza-se habitualmente para distinguir as águas subterrâneas de rápida circulação no aquífero (curto tempo de passagem), das que se movem de forma mais lenta ou que inclusive estão paradas. Além disso, permitem definir sistemas locais e/ou regionais de fluxo subterrâneo.

Como as concentrações de trítio nas águas subterrâneas reflectem os níveis de trítio na atmosfera à época em que a água entrou no subsolo (*i.e.* deixou de estar em contacto com a atmosfera), permitem a datação da recarga. O seu valor é semi-quantitativo (William *et al.* 2007) e em termos genéricos:

- ◆ < 0,8 TU indica água anterior a 1950;
- ◆ 0,8 a 4 TU indica uma mistura entre água anterior a 1950 e água moderna;
- ◆ 5 a 15 TU indica água moderna (< 5 a 10 anos);
- ◆ 15 a 30 TU indica alguma existência de testes termonucleares;
- ◆ > 30 TU indica que a recarga ocorreu nos anos 60 a 70.

No período de 3 semi-vidas (1963 to 2000), as concentrações em trítio decresceram 3 vezes, pelo que se aproxima do fim do prazo a sua utilidade como datador de recarga recente (William *et al.* 2007).

De forma idêntica ao trítio, também a presença de radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) antes dos testes

termonucleares do início dos anos 50 era apenas resultante de processos naturais resultantes da radiação cósmica, sendo o seu valor reduzido e estável na atmosfera. A elevada libertação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera conduziu ao incremento de <sup>14</sup>C naquele gás. À medida que a água circula abaixo do nível freático e se isola do CO<sub>2</sub> atmosférico, o decaimento radioactivo do <sup>14</sup>C causa o seu gradual decréscimo no carbono dissolvido presente na água.

A lei do decaimento radioactivo descreve a proporção com que a actividade do <sup>14</sup>C e todas as outras substâncias radioactivas decresce com o tempo (Freeze e Cherry, 1979):

$$A = A_0 2^{-t/T}$$

onde: A<sub>0</sub> é a actividade específica (desintegrações por unidade de tempo e de massa de amostra dpm/g) num tempo inicial (equivalente a 10 dpm/g antes de 1950)

A é actividade por unidade de massa de amostra (valor máximo mensurável é de 0,02 dpm/g)

t é o tempo

T é o período de semi-vida do isótopo (5730 anos)

Esta lei juntamente com a medição do conteúdo de <sup>14</sup>C nas águas subterrâneas (em HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, CO<sub>2</sub> (aq) e H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) permite datar há quanto tempo aquela água está isolada da atmosfera terrestre. A expressão acima pode ser rearranjada substituindo T:

$$t = - 8270 \ln (A/A_0)$$

Atendendo às actividades específicas da equação acima e do valor máximo de actividade mensurável, o período máximo de idade que é possível determinar são cerca de 50 000 anos.

### **3.8 Planeamento e gestão integrados: Planos de gestão de região hidrográfica em Portugal**

O enquadramento da gestão das águas, nomeadamente das águas interiores superficiais e subterrâneas, tem como principal unidade a região hidrográfica (que vem substituir a anterior unidade de bacia hidrográfica), que corresponde à área de terra e de mar constituída por uma ou mais bacias hidrográficas contíguas e pelas águas subterrâneas e costeiras que lhes estão associadas (Lei da Água, Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro).

A Lei da Água estabelece 8 regiões hidrográficas (RH) em Portugal Continental, cuja delimitação georreferenciada foi definida através do Decreto-Lei n.º 347/2007, de 19 de Outubro (Fig. 10).

A região hidrográfica passa a ser também a unidade principal de planeamento das águas, em particular através dos Planos de Gestão de Região Hidrográfica (PGRH). Os PGRH, cujo

conteúdo é definido no art. 29.º da Lei da Água, pretendem constituir-se como a base de suporte à gestão, à protecção e à valorização ambiental, social e económica das águas. Estes planos abrangem as bacias hidrográficas integradas numa região hidrográfica, os estuários, as áreas costeiras e os aquíferos associados.

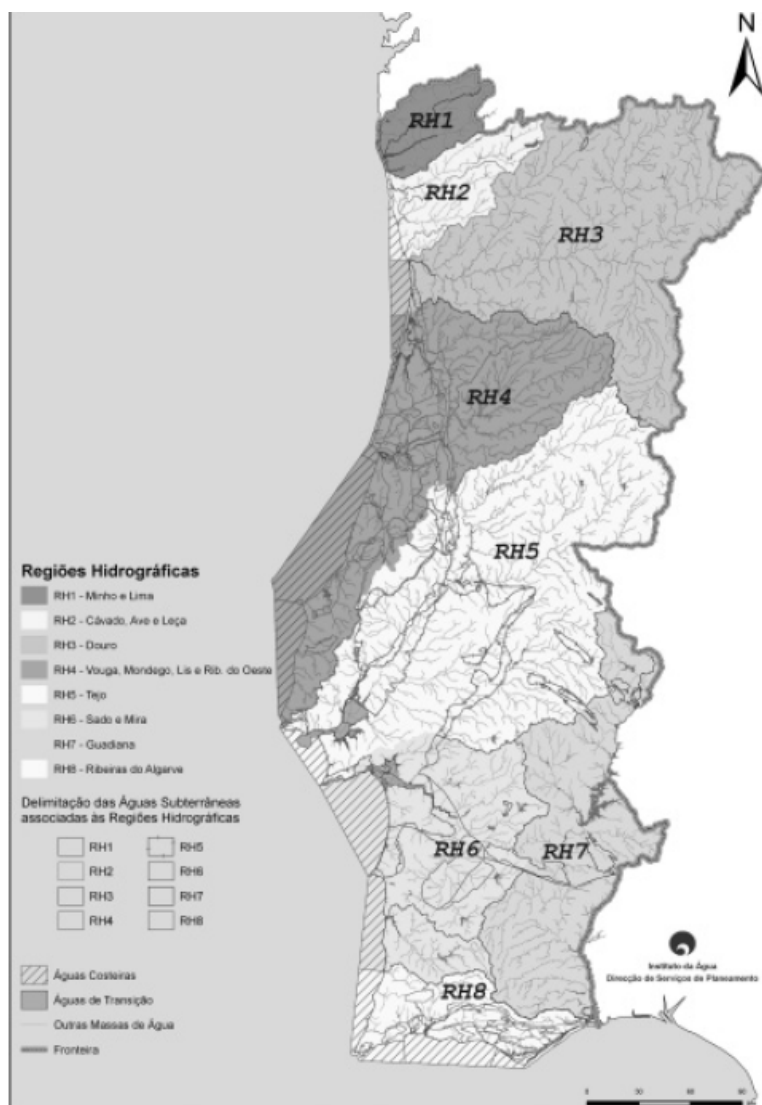


Fig. 10 - Delimitação das Regiões Hidrográficas de Portugal Continental (Decreto-Lei n.º 347/2007, de 19 de Outubro)

Os PGRH irão incluir, entre outros aspectos de interesse para as águas subterrâneas: uma descrição geral da região hidrográfica; uma caracterização das águas subterrâneas existentes na região hidrográfica, incluindo a identificação dos recursos, a delimitação das massas de águas subterrâneas e a determinação das condições de referência; uma caracterização das pressões naturais e incidências relacionadas com a actividade humana significativas e um programa de medidas que garanta a prossecução dos objectivos ambientais estabelecidos na Lei da Água, designadamente o balanço entre as potencialidades, as disponibilidades e as necessidades, bem como a boa qualidade das águas subterrâneas.

Os programas de medidas a elaborar para cada região hidrográfica compreendem medidas de base e medidas suplementares, funcionalmente adaptadas às características da bacia, ao impacte da actividade humana no estado das águas superficiais e subterrâneas e que sejam justificadas pela análise económica das utilizações da água e pela análise custo-eficácia dos condicionamentos e restrições a impor a essas utilizações (n.º 2, art.º 30.º).

Os programas de medidas de base (art.º 31.º), enquanto requisitos mínimos a cumprir, compreendem as medidas, projectos e acções necessários para o cumprimento dos objectivos ambientais, ao abrigo das disposições legais em vigor, designadamente as alíneas que se reproduzem:

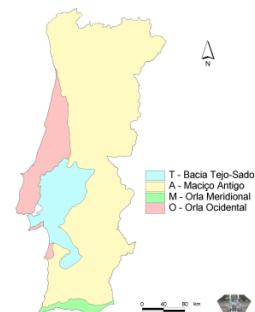
- g) medidas destinadas à protecção das massas de água destinadas à produção de água para consumo humano, incluindo medidas de salvaguarda dessas águas de forma a reduzir o tratamento necessário para a produção de água potável com a qualidade exigida por lei;
- n) medidas relativas à protecção das águas contra descargas de águas residuais urbanas;
- o) medidas relativas à utilização de produtos fitofarmacêuticos que contenham substâncias ou produzam resíduos nocivos para a saúde humana ou animal ou para o ambiente;
- p) medidas contra a poluição causada por motivos de origem agrícola.

Este conjunto de medidas destinam-se a promover a utilização eficaz e sustentável da água e incluem um programa de investimentos a realizar para atingir os objectivos definidos e calendarizados no Plano Nacional da Água.

Os planos específicos de gestão das águas, complementares dos planos de gestão de bacia hidrográfica, constituem planos de gestão mais pormenorizada a nível de sub-bacia, sector, problema, tipo de água ou sistemas aquíferos.

Do conjunto de medidas acima elencadas se compreende o forte investimento em termos de redução da poluição na fonte (descargas pontuais e difusas) através de um conjunto de medidas destinadas à protecção das massas de água na origem evitando assim gastos desnecessários no tratamento da água, nomeadamente para consumo humano.

Este programa de habilitação pretende contribuir para uma melhor gestão integrada e sustentável das águas subterrâneas, para a qual não só é fundamental ter em conta as principais pressões existentes em termos do risco para a qualidade da água, mas também compreender os principais fenómenos de contaminação que afectam ou podem vir a afectar os recursos hídricos subterrâneos do ponto de vista da sua qualidade, os impactes que podem causar e as respostas, em termos de medidas, projectos e acções necessários para o cumprimento dos objectivos ambientais, tal como preconizado na Lei da Água. O Programa de Estudos apresentado no Capítulo 10 apresenta alguns dos aspectos fundamentais onde se julga necessário continuar a investir, concretizando-os através de um conjunto de projectos que se propõe ajudar a edificar alguns dos programas de medidas dos PGRH.



## **4 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE PORTUGAL**

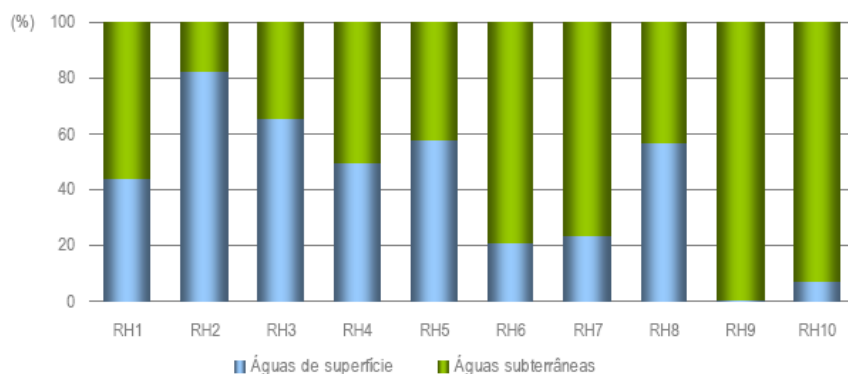
---

### **4.1 Importância no panorama nacional**

As necessidades de água em Portugal, incluindo os sectores urbano, agrícola e industrial, estão estimadas em cerca de 8 km<sup>3</sup>/ano (*i.e.* 8 mil milhões de m<sup>3</sup>/ano, o que se traduz em 800 m<sup>3</sup>/hab/ano) (Melo Baptista *et al.*, 2001, com informação actualizada para os volume totais captados para abastecimento urbano através de dados mais recentes do Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais, INSAAR 2005, cf. INAG 2007).

A agricultura consome cerca de 82% (6551 hm<sup>3</sup>/ano) do volume de água captado, o abastecimento urbano cerca de 14% (1086 hm<sup>3</sup>/ano) e a indústria os restantes 5% (385 km<sup>3</sup>/ano). Estas percentagens não se traduzem em custos de utilização, onde o sector urbano apresenta os custos mais relevantes devido aos diferentes sistemas tarifários (Melo Baptista *et al.*, 2001).

Em Portugal, de acordo com os dados do INSAAR 2005 apresentados na Fig. 11, as águas subterrâneas abastecem cerca de 44% da população do Continente servida por abastecimento público. Nas Regiões Autónomas as águas subterrâneas abastecem cerca de 99 e 93% da população servida, para as Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira, respectivamente (INAG, 2007).



RH1 (Minho e Lima); RH2 (Cavado, Ave e Leça); RH3 (Douro); RH4 (Vouga, Mondego, Lis e Ribeiras do Oeste); RH5 (Tejo); RH6 (Sado e Mira); RH7 (Guadiana); RH8 Ribeiras do Algarve; RH9 (Açores) e RH10 (Madeira)

Fig. 11 - População servida por abastecimento de água, por tipo de origem de água (extraído de Campanha INSAAR 2005, cf. INAG, 2007)

A água subterrânea para abastecimento é captada no Continente em 7215 captações cadastradas (sendo 291 o número de captações de águas de superfície) que extraem 399 hm<sup>3</sup> de água, valor que corresponde a cerca de 37% do volume total de água captado para abastecimento urbano ao nível do Continente, sendo o restante volume de origem superficial. O maior número de captações subterrâneas, que correspondem a cerca de 96% do total das captações, não se deve a maior volume captado mas sim à própria natureza do escoamento subterrâneo que conduz à necessidade de extracção de caudais em diversas captações por forma a obter um melhor rendimento de extracção. Por oposição ao que se passa no Continente, nas Regiões Autónomas, a maioria da população é servida por água de origem subterrânea, correspondendo os volumes de águas subterrâneas captados a 99 e 97% do total para os Açores e a Madeira, respectivamente (INAG, 2007).

A Fig. 11 apresenta a localização geográfica das captações de águas subterrâneas cadastradas para abastecimento.

Segundo dados do Plano Nacional da Água (PNA, 2001), os consumos de cerca de 385 hm<sup>3</sup>/ano estimados para a indústria repartem a sua origem em partes equivalentes entre águas subterrâneas e superficiais, com 46% e 54%, respectivamente, e têm maioritariamente origem própria (84%) e não pública.



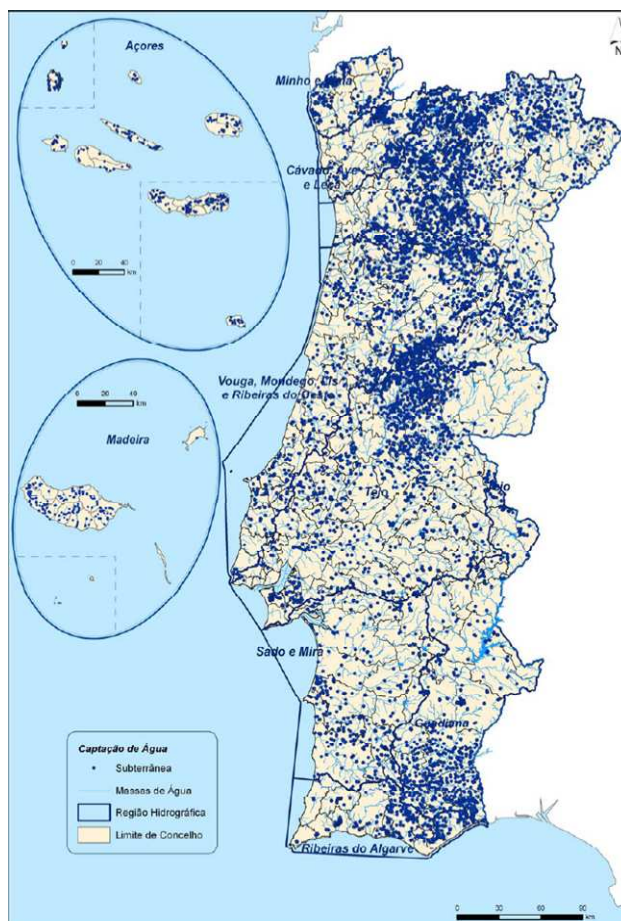


Fig. 12 - Localização geográfica das captações de águas subterrâneas (extraído de Campanha INSAAR 2005, cf. INAG, 2007)

A agricultura é a actividade que mais água consome no País, cerca de 6551 hm<sup>3</sup>, e que maior extensão do território ocupa (PNA, 2001). As águas subterrâneas representam 64% das origens de água, com valores de cerca de 4210 hm<sup>3</sup>/ano.

O Quadro 9 apresenta uma síntese da origem da água consumida em Portugal, incluindo o Continente e as Regiões Autónomas, para os diversos tipos de abastecimento.

Quadro 9 - Origem da água consumida em Portugal

Abastecimento	Origem				Consumo	
	Subterrânea		Superficial		total	
	%	Volume anual (hm <sup>3</sup> )	%	Volume anual (hm <sup>3</sup> )	%	Volume anual (hm <sup>3</sup> )
Urbano	37	399	63	687	13,5	1086
Agrícola	<b>64</b>	4210	36	2341	81,7	6551
Industrial	46	179	54	206	4,8	385
<b>TOTAL</b>	60	<b>4788</b>	40	<b>3234</b>	100	<b>8022</b>

Em síntese, verifica-se que as águas subterrâneas asseguram 60% do volume total de água consumida no País, sendo sua relevância predominante para o abastecimento agrícola, seguido do industrial e, por fim, o urbano.

Em termos do consumo de água para o sector doméstico, verifica-se que o valor médio no Continente é de 132 l/hab.dia e para as Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira de 158 e 168 l/hab.dia, respectivamente (INSAAR 2005, cf INAG, 2007). Este valor foi obtido através do volume de água consumido nas redes de abastecimento de água, cuja utilização é maioritariamente doméstica, seguida de comercial/serviços, industrial e agrícola/pecuária (valor apenas com alguma, fraca, expressão nas Regiões Autónomas).

## **4.2 Sistemas aquíferos e massas de águas subterrâneas**

### **4.2.1 Sistemas aquíferos**

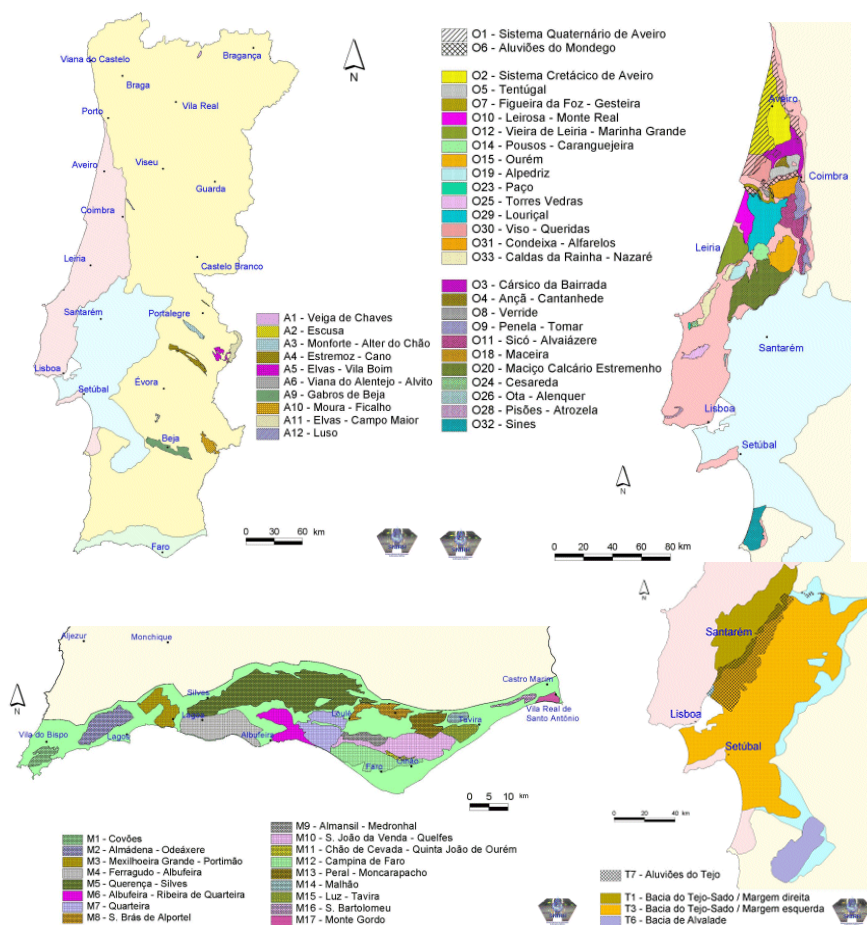
As águas subterrâneas consumidas no País são essencialmente captadas nos sistemas aquíferos delimitados (cf. Fig. 13) bem como nas formações do Maciço Antigo.

Portugal Continental está dividido em quatro grandes unidades hidrogeológicas (Delgado Rodrigues *et al.*, 1989): o Maciço Antigo ou Hespérico, Orla Mesocenozóica Ocidental, Orla Mesocenozóica Meridional e Bacia Terciária do Tejo-Sado. No seio destas unidades foram identificados os 58 sistemas aquíferos apresentados na Fig. 13.

Para a individualização dos 58 sistemas propostos, Almeida *et al.* (2000) consideram a definição de sistema aquífero de Navarro *et al.* (1989, in Almeida *et al.*, 2000) atrás referida, *i.e.* um domínio espacial, limitado em superfície e em profundidade, no qual existem vários aquíferos, relacionados ou não entre si, mas que constitui uma unidade prática para a investigação ou exploração.

As características litológicas das formações aquíferas determinam o tipo de meio onde ocorre o escoamento subterrâneo (cf. Fig. 5): intergranular ou poroso, cársico, poroso-cársico, poroso-fissurado e cársico-fissurado, sendo, entre os sistemas aquíferos, os de porosidade intergranular que ocupam maior área (60%) (PNA, 2001).

As restantes formações não englobadas nos sistemas aquíferos têm uma capacidade de armazenamento não desprezável e podem apresentar aquíferos de importância local.



Fonte: SNIRH (2006)

Fig. 13 - Sistemas aquíferos de Portugal Continental

O Maciço Antigo ocupa uma área de cerca de 3/4 do território continental e é constituído por rochas metamórficas e ígneas antemesozóicas intensamente dobradas e fracturadas (orientação NW-SE). Essas rochas, onde predominam xistos, metagrauvaques, quartzitos, mármore, granitos, granodioritos e pórfiros são, por vezes, recobertas por depósitos sedimentares mais modernos e de origem continental, possuindo em muitos casos interesse hidrogeológico.

As Orlas Mesocenoicas ocupam o litoral oeste e sul do País. Nestas unidades ocorre um conjunto muito diversificado de idades e de tipos litológicos de natureza essencialmente sedimentar, detrítica e calcária. As principais formações são carbonatadas, argilosas e areníticas com algumas intercalações de rochas ígneas intrusivas e extrusivas. Existem diversas estruturas diapíricas.

A Bacia Sedimentar do Tejo-Sado é constituída por formações detríticas de idade terciária e quaternária. As principais litologias presentes são calcários, arenitos, argilitos e margas, os mais recentes de origem aluvionar. Os níveis detríticos apresentam importante significado hidrogeológico, neles se situando o maior aquífero da Península Ibérica, com algumas das

melhores captações do País, com profundidades que atingem os 500 m.

As ilhas que fazem parte dos arquipélagos da Madeira e dos Açores são constituídas quase que exclusivamente por rochas vulcânicas. Do ponto de vista litológico estas rochas são, predominantemente, de natureza basáltica ou afim, embora sejam frequentes os materiais de natureza traquítica e riolítica. De um modo geral, as rochas mais recentes são mais porosas e mais permeáveis enquanto que as mais antigas são mais compactas (Lobo Ferreira *et al.*, 1995).

A análise estatística dos valores de produtividades dos diferentes sistemas aquíferos, agrupados por tipos litológicos, permitiu concluir que os sistemas aquíferos porosos apresentam maior produtividade, com uma mediana de 13,3 l/s. Os sistemas cársico-porosos e os sistemas cársicos apresentam medianas de 7,15 l/s e 6,7 l/s, respectivamente. Nos sistemas fissurados, que formam a maior parte das formações hidrogeológicas indiferenciadas, estima-se a produtividade mediana em 1 l/s (PNA, 2001). O Quadro 10 apresenta uma lista dos valores da mediana das produtividades dos sistemas aquíferos de Portugal Continental.

Quadro 10 - Valores da mediana das produtividades dos sistemas aquíferos de Portugal Continental (extraído de Almeida *et al.*, 2000)

	<b>Designação</b>	<b>n.º de valores</b>	<b>Mediana (l/s)</b>	<b>Tipo de aquífero</b>
A1	Veiga de Chaves	36	1,5	Intergranular
A2	Escusa	11	9,6	Carbonatado
A3	Monforte-Alter do Chão	27	3,3	Carbonatado
A4	Estremoz-Cano	51	2,5	Carbonatado
A5	Elvas-Vila Boim	49	1,7	Carbonatado
A6	Viana do Alentejo-Alvito			Cársico-fissurado
A9	Gabros de Beja	132	3,2	Poroso-fissurado
A10	Moura-Ficalho	14	8,25	Cársico-fissurado
A11	Elvas-Campo Maior	20	4,03	Intergranular
A12	Luso			Fissurado
O1	Quaternário de Aveiro	86	14,5	Intergranular
O2	Cretácico de Aveiro	66	15	Poroso-Cársico
O3	Cársico da Bairrada	62	3,2	Carbonatado
O4	Ançã-Cantanhede	8	1,3	Carbonatado
O5	Tentúgal	16	0,8	Intergranular
O6	Aluviões do Mondego	50	21,8	Intergranular
O7	Figueira da Foz-Gesteira	19	12,5	
O8	Verride			Carbonatado
O9	Penela-Tomar	8	1,7	Carbonatado
O10	Leirosa - Monte Real	76	10	Intergranular
O11	Sicó-Alvaiázere	13	4	Carbonatado
O12	Vieira de Leiria-Marinha Grande	32	15	Intergranular
O14	Pousos-Caranguejeira	30	5,1	
O15	Ourém	57	4,5	Intergranular
O18	Maceira			Carbonatado
O19	Alpedriz	34	2,2	
O20	Maciço Calcário Estremenho	28	0,8	Carbonatado

Designação	n.º de valores	Mediana (l/s)	Tipo de aquífero	
O23	Paço	32	8,3	Intergranular
O24	Cesareda	4		
O25	Torres Vedras	25	6	Intergranular
O26	Ota-Alenquer			Carbonatado
O28	Pisões-Atrozela	9		Carbonatado
O29	Louriçal -Cretácico	4		Intergranular
O29	Louriçal -Miocénico	23	1,7	Intergranular
O29	Louriçal -sinclinal	13	1,3	Intergranular
O29	Louriçal -Pombal	10	2,3	Intergranular
O30	Viso-Queridas	12	9,5	Intergranular
O31	Condeixa-Alfarelos	31	2,7	
O32	Sines -Poroso	7	2,6	Poroso-Cársico
O32	Sines -Cársico	13	15	Poroso-Cársico
O33	Caldas da Rainha-Nazaré	10	11,8	Intergranular
M1	Covões	10	15,5	Carbonatado
M2	Almádena-Odeáxere	111	5,6	Carbonatado
M3	Mexilhoeira Grande-Portimão	124	8,3	Poroso-Cársico
M4	Ferragudo-Albufeira	120	5	Poroso-Cársico
M5	Querença-Silves	487	11,1	Carbonatado
M6	Albufeira-Ribeira de Quarteira	136	9,4	Poroso-Cársico
M7	Quarteira	261	9	Poroso-Cársico
M8	S. Brás de Alportel	74	4,2	Carbonatado
M9	Almansil-Medronhal	111	7	Carbonatado
M10	S. João da Venda-Quelfes -C1		7	Intergranular
M10	S. João da Venda-Quelfes -C2		5,5	Intergranular
M11	Chão de Cevada-Quinta de João de Ourém	18	6	Carbonatado
M12	Campina de Faro	470	6	Poroso-Cársico
M13	Peral-Moncarapacho	40	2,8	Carbonatado
M14	Malhão	9	14,7	Carbonatado
M15	Luz-Tavira	220	5,6	Poroso-Cársico
M16	S. Bartolomeu	36	8,2	Carbonatado
M17	Monte Gordo	7	11	Intergranular
T1	Margem Direita -Calcários de Almoester	31	6	Carbonatado
T1	Margem Direita -Arenitos da Ota	143	11,1	Intergranular
T3	Margem Esquerda - Pliocénico	124	15,5	Intergranular
T3	Margem Esquerda - Arenitos da Ota	134	9,7	Intergranular
T3	Margem Esquerda - Miocénico francamente marinho	67	35	Intergranular
T6	Bacia de Alvalade	22	4,9	
T7	Aluviões do Tejo - aluviões	135	12	Intergranular
T7	Aluviões do Tejo - terraços	73	10	Intergranular

Em relação às reservas hídricas de águas subterrâneas, Lobo Ferreira *et al.* (1995) estimaram, com base nos valores da porosidade eficaz e nas litologias presentes, um valor total para o País superior a 100 km<sup>3</sup> dos quais mais de metade se encontram armazenadas na Bacia do Tejo-Sado/Margem Esquerda.

A avaliação das disponibilidades hídricas anuais, entendidas como o volume de águas subterrâneas que o aquífero ou formação hidrogeológica podem fornecer em condições naturais associada à recarga por infiltração da precipitação, é apresentada por Ribeiro (2004).

Os valores variam entre os intervalos mínimos de 0,05-0,1 hm<sup>3</sup>/ano/km<sup>2</sup> para as formações do Maciço Antigo e os valores mais elevados de 0,45-0,70 hm<sup>3</sup>/ano/km<sup>2</sup> para os aquíferos cársicos.

#### **4.2.2 Massas de águas subterrâneas**

A identificação e a delimitação das massas de águas subterrâneas foram recentemente apresentadas para Portugal Continental (INAG, 2005), de acordo com o preceituado no Anexo II, Parte C da Directiva das Águas Subterrâneas.

A metodologia preconizada incluiu duas etapas. A primeira etapa consistiu em individualizar o substrato litológico onde se encontram as águas subterrâneas. Essa individualização teve em conta os três meios hidrogeológicos – poroso, cársico e fracturado – tendo-se utilizado abordagens metodológicas diferentes para individualizar massas de água em meios porosos e cársicos das massas de água em meios fracturados. A segunda etapa consistiu na identificação, para cada um desses meios, de diversos critérios para a delimitação das massas de água. Considerou-se uma mesma massa de água quando: há uma conexão hidráulica; a sua dimensão é suficientemente grande para ser representável e ter importância, pelo menos, local; há semelhança do quimismo, entre vários outros aspectos cujos detalhes devem ser analisados em INAG (2005).

INAG (2005) identificou 91 massas de águas subterrâneas distribuídas pelas 8 regiões hidrográficas de Portugal Continental conforme apresentado na Fig. 14 e na Fig. 15.

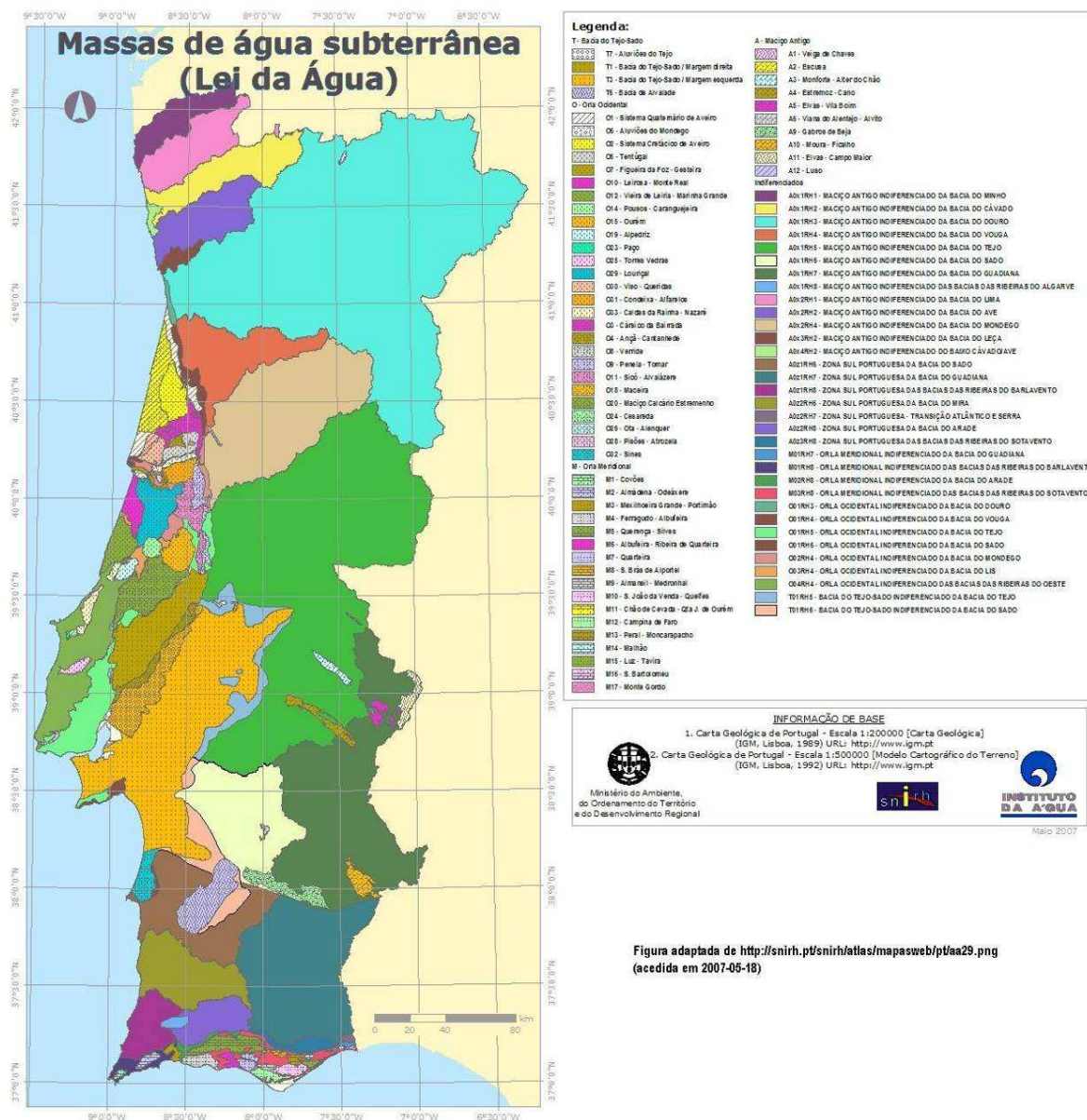


Fig. 14 - Delimitação das massas de água subterrânea em Portugal Continental (cf. <http://snirh.pt/snirh/atlas/mapasweb/pt/aa29.png>)

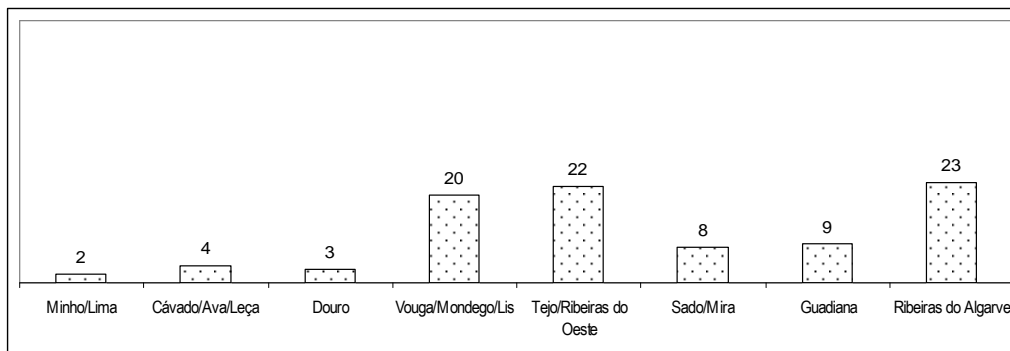


Fig. 15 - Distribuição das massas de águas subterrâneas por região hidrográfica (INAG, 2005)

### 4.3 Qualidade natural das águas subterrâneas

De acordo com Guerreiro e Pereira (2002), 44% dos aquíferos de Portugal Continental possuem fácies bicarbonatada cálcica, 16% bicarbonatada calco-magnésiana e 12% cloretada sódica, entre outras fácies com menor expressão apresentadas na Fig. 16. De notar que cerca de 10% de aquíferos não tem dados suficientes para a determinação da sua fácies (cf. Fig. 16) e que as percentagem determinadas tiveram por base 62 sistemas aquíferos, entretanto reclassificados para 58 sistemas.

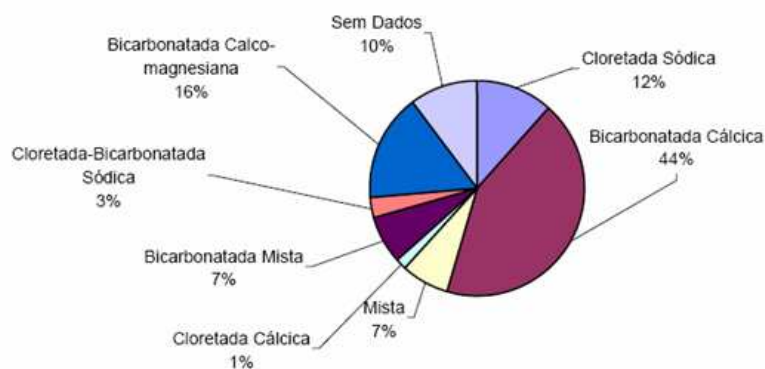


Fig. 16 - Repartição dos tipos de fácies hidroquímica dos sistemas aquíferos de Portugal Continental (extraído de Guerreiro e Pereira, 2002)

Alguns ambientes geoquímicos conferem às águas subterrâneas características de contaminação natural, *i.e.* com elementos acima dos valores indicados na legislação, mas cuja proveniência deriva do contacto água - matriz porosa. Os principais elementos que podem ter origem natural são (Vrba e Lipponen, 2007): arsénio, ferro, cloretos (salinidade) e fluoretos e, menos frequentemente, o magnésio, sulfatos, manganés, selénio e outras espécies inorgânicas.

O ambiente hidrogeológico em Portugal confere às águas subterrâneas uma composição química natural com concentrações elevadas em alguns elementos, de que se destaca o ferro e o manganés presentes nas unidades hidrogeológicas da Orla Mesocenozóica Ocidental e Meridional e da Bacia Cenozóica do Tejo-Sado. Estas concentrações, frequentemente superiores ao valor limite da água para consumo humano, devem-se à presença de águas de baixo pH que conferem características de solubilidade ao ião Fe em detrimento da sua precipitação. Um outro exemplo que ocorre em algumas zonas de Portugal é a presença de cloretos elevados como resultado da circulação de águas subterrâneas em zonas diapíricas, *e.g.* Rio Maior. Por fim, outro exemplo clássico no País deve-se à presença de águas de elevada dureza resultantes da dissolução de rochas carbonatadas dos vários aquíferos cársicos existentes.

Para a definição do estado químico das águas subterrâneas (Quadro 1), no âmbito da



Directiva-Quadro da Água, é necessário que os Estados-membros efectuem uma caracterização química detalhada da sua qualidade, com base na definição de limiares de qualidade. Estes limiares são baseados no conhecimento do modelo conceptual da massa de água subterrânea, na sua caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica, e na definição da sua qualidade natural (concentração de fundo geoquímico<sup>1</sup>).

No âmbito do projecto BRIDGE, "Natural background values and threshold values – the European BRIDGE Project", que contou com a participação da Universidade de Aveiro, procurou-se homogeneizar os conceitos Europeus a serem utilizados pelos vários estados-membros em termos de cálculo de concentrações de fundo geoquímico das águas de um sistema aquífero. Foi proposta uma metodologia de valores a serem definidos pelos estados-membros (no caso Português pelo Instituto da Água, como Autoridade Nacional da Água) até finais de 2008. A metodologia implica que sejam seleccionadas amostras sem contaminação antropogénica, materializada na ausência das 33 substâncias prioritárias definidas na Decisão n.º 2455/2001/CE<sup>2</sup> e na concentração em nitratos inferior a 10 mg/l. Para o conjunto de amostras que respeitam estas duas condições são determinadas as concentrações de fundo geoquímico de cada parâmetro que correspondem ao respectivo valor do percentil 90<sup>3</sup> ou, para os casos em que se tem a certeza que não há influências antropogénicas, o percentil 97,7.

O Quadro 11 apresenta uma síntese de alguns dos elementos que foram identificados em concentrações elevadas nas características naturais da qualidade das águas subterrâneas em Portugal, com base num recente trabalho desenvolvido no âmbito do projecto BRIDGE (cf. Meus *et al.*, 2006).

Quadro 11 - Resumo das características principais naturais da qualidade das águas subterrâneas em Portugal (adaptado de Meus *et al.*, 2006)

Tipo de Aquífero	Litologia	Idade	Elemento natural
Detrítico multicamada	Cascalho, areia, silte e argila	Quaternário	As, Fe, Mn
Detrítico	Areias, argilas, margas	Meso-cenozóico	Cl, Fe, Mn, F
Carbonatado não carsificado	Calcário, dolomite, margas	Jurássico	SO <sub>4</sub>
Cristalino	Granitos e xistos	Paleozóico	Al, As

As características naturais apresentadas podem ser alteradas por actividades antropogénicas,

<sup>1</sup> «Concentração de fundo geoquímico», tal como vem definido na Directiva das Águas Subterrâneas (Directiva 2006/118/CE) é a concentração de uma substância ou o valor de um indicador numa massa de água subterrânea correspondente à ausência de modificações antropogénicas ou apenas a modificações antropogénicas diminutas relativamente a condições inalteradas.

<sup>2</sup> Lista das substâncias prioritárias: **metais pesados** (cádmio e compostos de cádmio, chumbo e compostos de chumbo, mercúrio e compostos de mercúrio, níquel e compostos de níquel); **metais orgânicos** (composto de tributileno); **pesticidas** (alachloro, atrazina, clorfenvinfos, clorpirifos, isotroturon, diuron, endosulfan, simazina, trifluralina); **hidrocarbonetos** (antraceno, benzeno, fluoranteno, naftaleno, hidrocarbonetos poliaromáticos); **hidrocarbonetos cloretados** (1,2-dicloroetano, éteres difenílicos bromados, c10-13-cloroalquenos, diclorometano, hexaclorbenzeno, hexaclorbutadieno, hexaclorociclohexano, pentaclorbenzeno, pentaclorfenol, triclorbenzenos, triclorometano); **fenóis e compostos relacionados** (octilfenóis e nonilfenóis); **disruptores endócrinos** (di(2-etilhexil)ftalato)

<sup>3</sup> O percentil 90 corresponde ao valor da concentração abaixo da qual existem 90% das amostras ordenadas por ordem crescente

sendo o grau e a extensão dos efeitos dessas alterações dependente dos contaminantes, da sua quantidade e da forma como são rejeitados, bem como das características do meio receptor.

#### **4.4 Principais problemas de poluição das águas subterrâneas**

Em termos gerais para Portugal, os principais problemas de qualidade da água são causados por: uma insuficiência de sistemas de tratamento de águas residuais urbanas e industriais (químicas e metalúrgicas) bem como pelo mau funcionamento de sistemas existentes; por contaminação difusa agropecuária (essencialmente causada por más práticas agrícolas); por contaminação pontual, embora muito difusa no território, proveniente de suiniculturas, aviários e antigas lixeiras; por escorrências e infiltrações em áreas de explorações mineiras; e por fugas de combustível em áreas de abastecimento e focos de contaminação relacionados com o armazenamento de produtos químicos, entre outras origem também referidas no Plano Nacional da Água cuja origem se deve ao deficiente ordenamento do território.

Dentre as actividades antrópicas potencialmente poluidoras anteriormente referidas, a agricultura reveste-se de grande importância na alteração da qualidade das águas subterrâneas, na medida em que é responsável por um importante aumento das taxas de recarga do aquífero através da própria irrigação (81,7% do consumo de água em Portugal destina-se a actividades agrícolas). Nas últimas décadas, a actividade agrícola tem conduzido a um aumento significativo dos casos de contaminação de águas subterrâneas com produtos agroquímicos, principalmente fertilizantes nitrogenados (em Portugal Continental foram declaradas 8 zonas vulneráveis como resultado dessas práticas, cf. <http://www.idrha.min-agricultura.pt/hidrologia/aquiferos/index.htm#>) e fosforados, inseticidas e herbicidas.

Os exemplos de contaminação ou de sobreexploração mais conhecidos em Portugal são a contaminação por nitratos nas zonas vulneráveis, de que se destacam alguns aquíferos do Algarve e das aluviões do Tejo, a sobreexploração do sistema aquífero multicamada de Aveiro e da região da Campina de Faro acompanhada de intrusão marinha, a contaminação industrial do aquífero quaternário de Aveiro, e a contaminação microbiológica e química do Maciço Hespérico (Mendonça, 1998).

Apesar do papel fundamental, por vezes pouco apreciado, que as águas subterrâneas têm para o País, a sua protecção tem sido deixada ao acaso e carece de uma acção concertada a nível da região hidrográfica que se procura agora para os Planos de Gestão de Região Hidrográfica preconizados na Lei da Água.

Nos capítulos seguintes contribui-se para uma apresentação global das principais pressões a que estão sujeitas as águas subterrâneas e a sua qualidade, tendo em consideração o impacto das principais actividades antropogénicas no estado do meio hídrico, visando avaliar as necessidades de investigação nos diferentes domínios por forma a proteger e melhorar a qualidade deste importante recurso, em jeito de uma *response* (DPSIR).



## **5 CONTROLO DA CONTAMINAÇÃO DIFUSA DE ORIGEM AGRÍCOLA**

---

### **5.1 Introdução**

O sector agrícola é um pilar fundamental para a economia competitiva dos países, através da geração de riqueza, devendo simultaneamente contribuir para preservar e para potencializar os valores ambientais das áreas onde se desenvolve.

Em Portugal Continental, e também no conjunto dos países da União Europeia, as áreas ocupadas pela agricultura e pela silvicultura representam uma grande percentagem da área total do território. Em 1995 cerca de 43% (138 milhões de hectares) da área total da União Europeia (EU-15) era usada para a agricultura (Vall e Vidal, 1999). Segundo os mesmos autores, entre 1985 e 1995, essa área diminuiu 2,7%, embora o volume de produtos agrícolas tenha aumentado 5%. No caso de Portugal este valor corresponde a mais de 75% da área ocupada (77% em 2001) (PNPOT, 2006). Esta posição destacada em termos de ocupação e de uso do solo é também válida no que se refere aos consumos de água, uma vez que a agricultura é o principal utilizador deste recurso (81,7% do consumo total, dos quais 64% tem origem subterrânea, cf. Quadro 9 da Secção 4.1).

A estrutura de uso e ocupação do solo no País é muito diversificada como resultado da grande variabilidade das condições geomorfológicas, do tipo de solo e das condições climáticas.

Em termos da preservação da qualidade da água, a extensão da ocupação do solo e do respectivo coberto vegetal são factores determinantes para a quantidade e a qualidade das águas subterrâneas subjacentes, em especial atendendo ao facto de existirem muitas situações em que as áreas mais adequadas ao cultivo intensivo se localizam em áreas de infiltração máxima, onde se processa a recarga principal dos aquíferos. Nesses casos o

excesso de irrigação traduz-se num elevado potencial de contaminação difusa. Este tipo de ocupação aliada a deficientes práticas agrícolas tem como consequência que cerca de 1/3 das massas de águas subterrâneas da Europa excedem o limite de 50 mg/l de nitratos estabelecido nas normas de qualidade para as águas subterrâneas (cf. EEA, 2000, in Quevauviller, 2005), no Anexo I da Directiva das Águas Subterrâneas (DAS). Em Portugal, mais de 50% da área de afloramento de alguns sistemas aquíferos é de ocupação agrícola.

No contexto do exposto, a aplicação da Lei da Água e da DAS, ambas tendo como objectivo a protecção da qualidade das águas, têm implicações directas nos modos de produção e nas práticas agrícolas. O Capítulo 2 apresenta um conjunto de outros diplomas normativos que devem também ser articulados para uma gestão integrada e sustentável da agricultura, de entre os quais se destacam o decreto-lei das zonas vulneráveis e dos produtos fitofarmacêuticos, entre outros referidos no Quadro 3 e ilustrados na Fig. 2.

A sustentabilidade ambiental da agricultura implica não apenas a redução das perdas de água e a racionalização dos consumos (de 6551 hm<sup>3</sup>/ano, cf. Secção 4.1), tornando mais eficiente a utilização da água sem prejuízo da sua eficácia, mas também o uso adequado de fertilizantes e pesticidas (cujo consumo é considerado baixo pela EUROSTAT, cf. PDR 2007-2013) permitindo, no seu conjunto valorizar, proteger e gerir de forma equilibrada os recursos hídricos e respeitar a legislação em vigor.

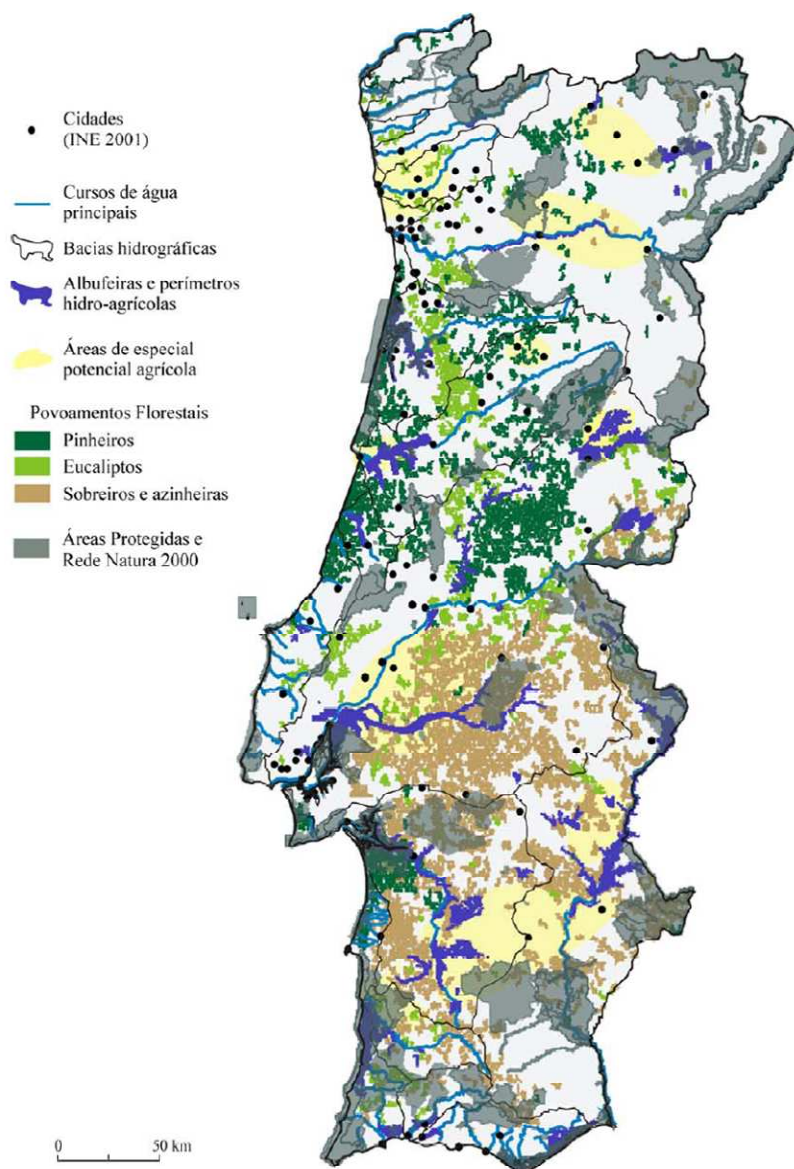
A optimização da ocupação do solo atendendo às características das diferentes regiões é fundamental que seja baseada com recurso a modelos de apoio à decisão. O modelo é composto por uma função objectivo para a maximização dos benefícios líquidos da actividade agrícola e por restrições que impõem limitações a essa actividade, tendo em linha de conta diferentes tipos de solos, diferentes práticas agrícolas, disponibilidades hídricas e consequências ambientais sobre os sistemas subterrâneos e ou superficiais que possam vir a ser afectados.

## **5.2 Situação geral da agricultura em Portugal**

A actual situação do sector agrícola em Portugal é identificada nas suas diversas vertentes em diversos planos nacionais de que se destacam o Plano Estratégico Nacional do Desenvolvimento Rural (PDR, 2007-2013), o Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território (PNPOT, 2006) e o Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (PNUEA, 2001). Apresenta-se uma breve síntese da situação em Portugal com base na informação contida nos referidos planos.

De acordo com os critérios comunitários, Portugal Continental tem 86,6% da Superfície Agrícola Útil (SAU) classificada em região desfavorecida, da qual 30,8% em zona de montanha. Cerca de 21% do território nacional faz parte integrante da Rede Natura 2000, que representa

19% da SAU (PDR 2007-2013), cf. Fig. 17. Grande parte (75%) do território continental português é dominado pelo uso agro-florestal, com 47,9% de áreas agrícolas e 27,5% de povoamentos florestais, tendo ocorrido nos 14 anos antecedentes uma ligeira diminuição do seu peso no total (-1,3%), devido ao decréscimo quer das áreas agrícolas (-1,9%) quer dos povoamentos florestais (-1,5%) (PNPOT, 2006).

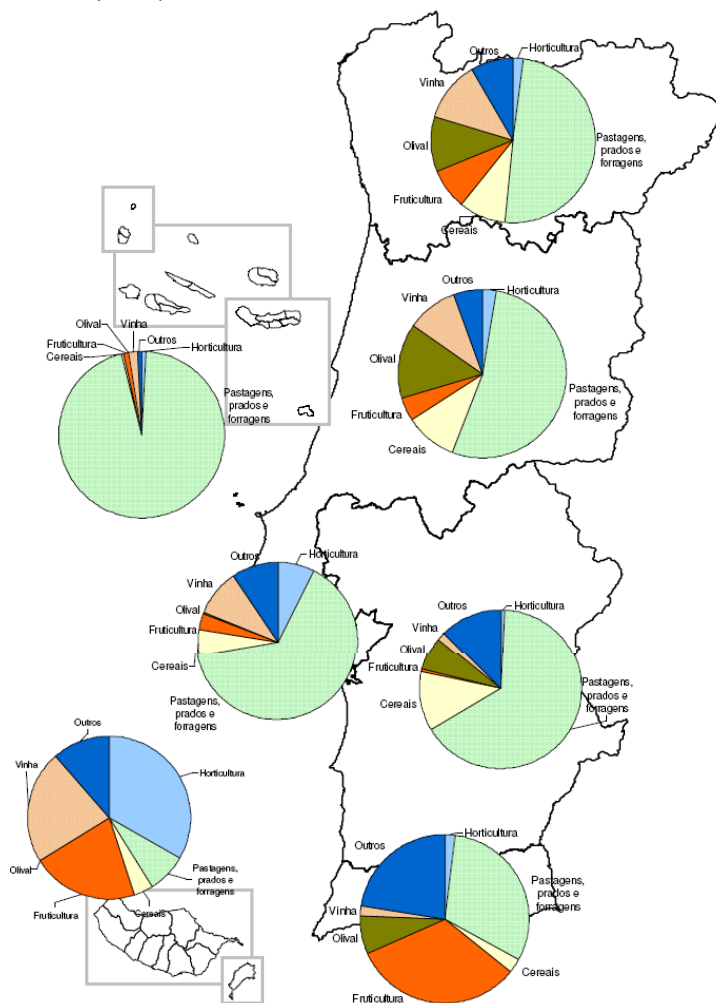


Fonte: SIG PNPOT, 2006

Fig. 17 - Sistemas naturais e agro-florestais em Portugal Continental (extraído de PNPOT, 2006)

Observa-se uma forte mudança da estrutura interna da área agrícola na medida em que diminuíram as culturas anuais de sequeiro e a agricultura com espaços naturais para dar lugar a culturas anuais de regadio e a vinha (PDR 2007-2013).

Segundo o PDR 2007-2013, no Continente, as culturas dominantes são as pastagens, prados e forragens, (com 59% da SAU), cereais (11%), olival (9%), vinha (5%), frutas (4%) e hortícolas (2%). Regionalmente, o Alentejo tem uma expressão reduzida no conjunto das áreas afectas ao olival, vinha, frutas e hortícolas, enquanto o Algarve tem mais de 40% da área com estas culturas. As culturas agrícolas permanentes, nomeadamente a vinha e olival, localizam-se expressivamente no interior de norte a sul do País. Já as espécies florestais dominam a paisagem do centro para o litoral e seguem uma tendência de aumento de área. As espécies florestais dominantes no Continente são o pinheiro bravo (29% da área florestal), o sobreiro (21%) e o eucalipto (20%).



Culturas Agrícolas	Área na SAU (10 <sup>3</sup> ha)
Horticultura	60
Prados, pastagens e forragens	2 215
Cereais	377
Fruticultura	134
Olival	317
Vinha <sup>3</sup>	196
Outros	380
SAU	3 680

Fonte: INE, 2005 (inquérito por amostragem a 10% das explorações).

Fig. 18 - Distribuição das culturas agrícolas em Portugal (extraído de PDR 2007-2013)

O peso do Valor Acrescentado Bruto (VAB) agrícola e florestal no VAB total do País é de 3,3%. O Alentejo é a região em que o peso do sector agrícola é mais significativo, com 16% do VAB

regional, enquanto Lisboa se situa nos 0,6% (PDR 2007-2013). Nos últimos 25 anos o valor global do produto agrícola manteve-se estável em termos reais.

## **5.3 Contaminação agrícola e seus potenciais efeitos na qualidade das águas subterrâneas**

### **5.3.1 Origens da contaminação**

Reconhece-se que a contaminação difusa de origem agrícola tem efeitos adversos na qualidade dos solos, das águas superficiais (ribeiras, rios e albufeiras) e das subterrâneas, e que a contaminação e eutrofização dessas águas representam uma ameaça para a preservação da qualidade da água para o abastecimento e para os ecossistemas associados.

A contaminação difusa de origem agrícola reveste-se de características particulares associadas ao facto de abarcar uma multiciplidade de origens pontuais que, no seu todo, podem ter efeitos adversos significativos. As fontes difusas de contaminação entram no ambiente subterrâneo de forma dispersa, em áreas extensas e em intervalos intermitentes, pelo que a sua monitorização não é simples.

Nas últimas décadas tem-se observado um aumento significativo dos casos de contaminação de águas subterrâneas com produtos agroquímicos, principalmente fertilizantes nitrogenados e fosforados, insecticidas e herbicidas. Em Portugal, em termos de fontes de contaminação difusa, a pressão considerada mais significativa para as massas de águas subterrâneas resulta de actividades agrícolas (INAG, 2005), em geral associada à presença de nutrientes, existindo ainda um grande desconhecimento em relação à contaminação com pesticidas apesar avanços conseguidos em diversos trabalhos realizados nos últimos anos (Cerejeira *et al.*, 2000, 2003 e Batista, 2003).

As actividades principais associadas às práticas agrícolas e que podem ser consideradas uma fonte de contaminação são a aplicação de fertilizantes e de pesticidas, e o armazenamento e aplicação de estrumes ou de lamas de resíduos sólidos ao solo. Os fertilizantes, estrumes ou lamas de depuração são usados basicamente para completar o suprimento natural de nutrientes do solo, com a finalidade de satisfazer a procura das culturas, visando produções economicamente viáveis, e compensar as perdas de nutrientes que porventura ocorram em virtude da absorção pela própria colheita ou da lixiviação e perdas gasosas, além de pretender melhorar ou manter boas condições do solo para as novas culturas.

Os fertilizantes são classificados atendendo ao seu conteúdo em azoto (N), fósforo (P) e potássio (K). As necessidades de aplicação dependem largamente do tipo de cultura e das condições da região onde é aplicado. Em termos gerais a aplicação de fertilizantes na Europa, expressa em N, varia entre 30 e 300 kg/ha.ano (Fig. 19). Portugal encontrava-se, em termos estatísticos até 1995, entre os países com menor carga de azoto aplicada. O Quadro 12

apresenta alguns valores relativos às necessidades de fertilizantes das diferentes culturas. O fósforo também é um elemento essencial para o crescimento das plantas que é fornecido através de fertilizantes minerais ou orgânicos (entre 5 e 55 kg/ha.ano, de acordo com os dados de 20 países da Europa para o ano 2003, referidos em Herbke *et al.* 2005, onde o valor estimado para Portugal é inferior a 20 kg/ha.ano).

Quadro 12 - Quantidades de nutrientes principais removidos do solo por algumas culturas (Soveral Dias, 1994)

Cultura	Produção (t.ha <sup>-1</sup> )	Exportação (kg.ha <sup>-1</sup> )		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Abóbora	20	110	28	125
Aipo	18	130	50	200
Alcachofra	26	220	53	743
Alface	25-35	63-88	25-35	150-210
Alho	10-14	111-182	43-174	80-415
Alho Francês	15-50	50-167	30-100	60-200
Arroz	4-10	49-122	24-60	44-111
Aveia	1-4	23-90	10-40	28-110
Batata primor	15-60	75-300	35-141	158-630
Batata temporã	15-60	75-300	33-133	133-533
Beterraba de mesa	40-65	132-275	48-116	258-572
Beterraba forrag.	50	150	50	250
Beterraba sacarina	61	125	30	160
Cártamo	1	30	8	11
Cebola	15-50	45-150	24-80	66-220
Cenoura	15-50	72-240	28-93	111-370
Centeio	1-4	33-133	10-40	27-107
Cevada	3-8	54-143	32-86	69-186
Chicória	50	89	40	227
Couve bróculos	20	90	34	84
Couve de Bruxelas	5	180	60	170
Couve chinesa	60	120 -	40-60	200
Couve comum	35	190	90	180
Couve flor	25	170	70	220
Couve galega	11	45	16	39
Couve lombarda	40	320	80	300
Couve repolho	35-50	250	85	250
Ervilha	7-10	438-625	105-150	228-325
Espargos (4.º ano)	3	75	20	80
Espinafres	15	90	30	100
Fava	10-14	120	30	80
Feijão verde	4,5	135-219	8-13	58-62
Feijão seco	1,5-4,5	45-135	11-34	38-113
Funcho	30-35	55	20	120
Girassol	1-4	27-108	17-68	13-52
Luzerna	50	219	53	190
Melão	20-24	49-122	17-23	112-229
Milho grão	3-16	83-440	31-165	65-347
Milho forragem	40-90	98-220	40-91	133-300
Morango	25-50	108	70	190
Nabo	20-30	100	60	100
Pepino	15-30	47-50	13-40	65-80
Pimento	41-54	183-201	47-56	269-277



Cultura	Produção (t.ha <sup>-1</sup> )	Exportação (kg.ha <sup>-1</sup> )		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Salsa	20	55	20	120
Soja	2	150	35	60
Tabaco	2-3	106-159	59-88	182-274
Tomate	20-70	63-220	17-60	91-320
Trigo	3-8	62-166	26-70	60-160
Vinha	10	80	30	100

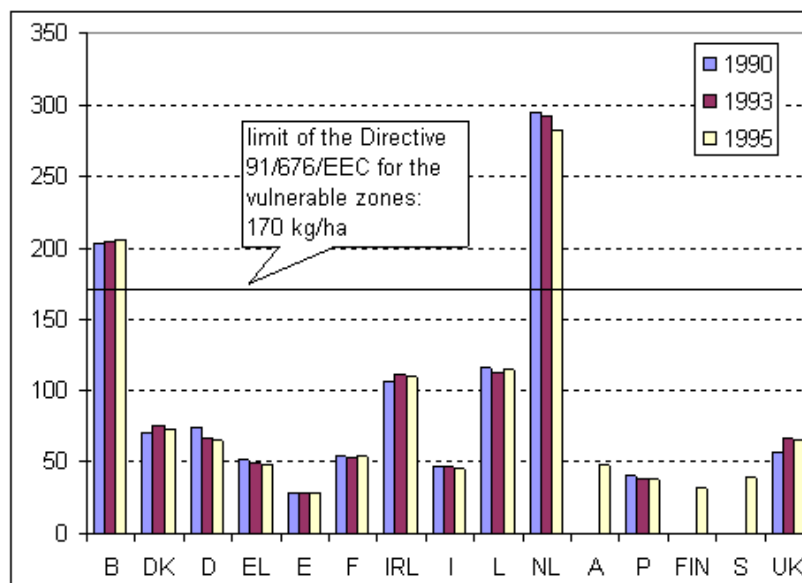


Fig. 19 - Carga de azoto utilizada em fertilizantes (kg/ha) em diversos países da Europa (extraída de Eurostat, in Vall e Vidal, 1999)

A agricultura é o maior utilizador de pesticidas. A aplicação de pesticidas, *i.e.* insecticidas e herbicidas que contêm uma ou mais substâncias activas, tem por objectivo o combate às pragas vegetais e animais que porventura venham a reduzir a produção da cultura. Em geral, os pesticidas apresentam um elevado potencial para contaminar o ar, o solo e a água sendo um dos factores mais relevantes no tocante à contaminação das águas. Bidleman (1999) e Van Dijk e Guicherit (1999) colocaram a atmosfera como principal meio receptor e de disseminação da contaminação, levando o contaminante até ao solo e aos recursos hídricos superficiais e subterrâneos por diferentes processos. Uma vez atingido o solo e a água, superficial ou subterrânea, a presença de pesticidas é caracterizada pela sua persistência e mobilidade no ambiente.

Apesar da legislação europeia fazer um apelo cada vez maior a práticas agrícolas sustentáveis, como a agricultura extensiva e biológica, quase metade do orçamento comunitário é gasto numa Política Agrícola Comum que discrimina positivamente a agricultura intensiva assente em pesticidas (só em 1999 foram utilizadas 327000 toneladas de pesticidas na agricultura europeia)

### 5.3.2 Principais contaminantes

O conjunto de actividades acima descritas contribui como fonte de contaminação difusa relativamente aos seguintes contaminantes principais:

- ◆ nutrientes (compostos de azoto e de fósforo e diversos outros macro e micro nutrientes de que se destaca o potássio);
- ◆ sais;
- ◆ pesticidas;
- ◆ organismos patogénicos (bactérias, vírus e outros microrganismos);
- ◆ sólidos em suspensão ou sedimentos.

O grau e extensão da contaminação difusa dependem de um conjunto de factores (DEFRA, 2004): climáticos (intensidade e frequência da precipitação); geomorfológicos (tipo de solo, topografia; erosão); conteúdo em matéria orgânica; capacidade de atenuação da contaminação; permeabilidade e ligação a massas de água).

### 5.3.3 Mobilidade no meio subterrâneo

#### 5.3.3.1 Aspectos gerais

A mobilidade dos diversos elementos contaminantes gerados pelas práticas agrícolas é condicionada pelo próprio ciclo hidrológico, designadamente pela precipitação e pela evapotranspiração, e pelos processos de rega. Efectivamente, o processo de recarga natural é responsável pelo arraste do nitrato em excesso presente no solo, aspecto que se faz sentir mesmo fora do período de cultivo. Por outro lado, conjugação da presença de elementos em excesso no solo, *i.e.* não utilizáveis pelas plantas, associada a processos de rega onde sejam utilizadas quantidades excessivas de água conduz à lixiviação do nitrato através do solo.

No contexto do exposto, regista-se que a melhoria da eficiência de rega tem repercussões importantes não apenas ao nível da poupança de água mas também por poder contribuir para diminuir significativamente a lixiviação de contaminantes para horizontes mais profundos no solo.

Os processos de dispersão de contaminantes podem efectuar-se através do solo, podendo atingir as águas subterrâneas, ou à sua superfície, como resultado do escoamento superficial, podendo atingir as águas superficiais e as águas subterrâneas, também por lixiviação através do solo. As quantidades de nutrientes perdidas dependem do tipo de solo, do conteúdo em matéria orgânica, do clima, da topografia e da profundidade ao nível piezométrico, bem como no tipo e quantidade de fertilizante aplicado durante o período em curso e em fases anteriores

e do tipo de irrigação utilizada.

### 5.3.3.2 Nutrientes

A presença de nutrientes inorgânicos no solo é uma condição necessária ao bom crescimento das plantas, sendo os compostos de azoto (amónia, nitrato) e de fósforo os seus principais constituintes, a que se juntam diversos outros macro e micro nutrientes (potássio, cálcio, sulfatos, etc.).

A principal forma de entrada do azoto no meio aquático é através de formas inorgânicas como o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), o nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), surgindo também como compostos de azoto dissolvido como o ião amónio ( $\text{NH}_4^+$ ) e o amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). O azoto ( $\text{N}_2$ ) e várias formas de azoto orgânico ( $\text{NH}_2$ ) são possíveis, apresentando diferentes graus de oxidação (Fig. 20). No amoníaco e nos compostos orgânicos, os compostos azotados surgem no seu estado de menor oxidação: - 3. O maior grau de oxidação dos compostos azotados surge no nitrato, com valor igual a + 5.

A evolução dos compostos azotados no meio subterrâneo é condicionada por um conjunto de factores biológicos, químicos e hidrogeológicos, responsáveis pela sua ocorrência em diferentes estados. A dinâmica do ciclo do azoto, com a passagem de uns estados de oxidação do azoto a outros, assenta no conjunto de processos principais descritos através da Fig. 20 (Freeze e Cherry, 1979, Canter *et al.*, 1987, SGE, 1991, Lobo Ferreira *et al.*, 1993 e Appelo e Postma, 1993): a fixação, a amonificação, a nitrificação, a desnitrificação e a mineralização.

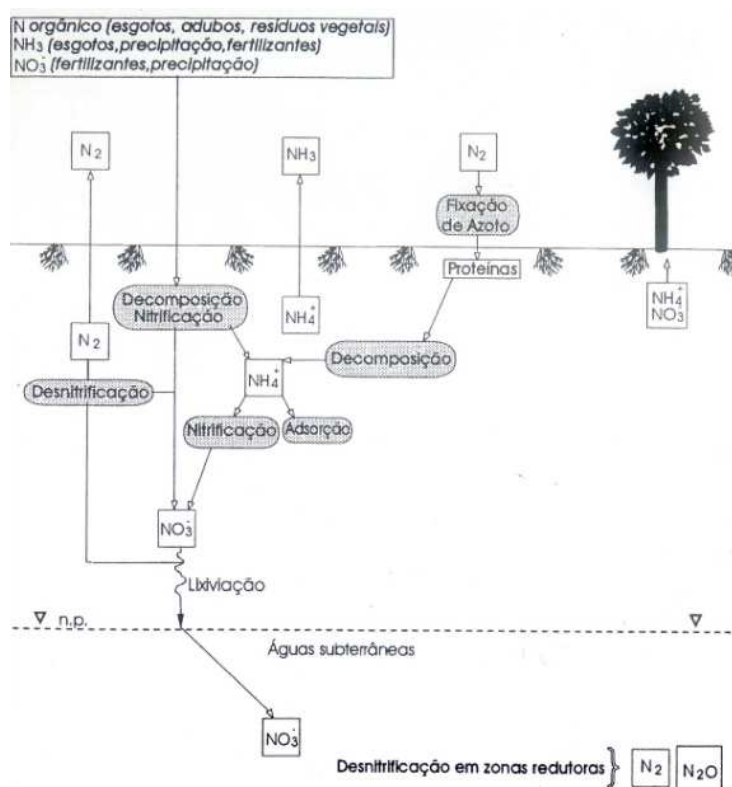


Fig. 20 - Ciclo do azoto no meio subterrâneo (adaptado de Freeze e Cherry, 1979, in Leitão, 1997)

A fixação de N<sub>2</sub> é um processo que ocorre entre a atmosfera e o solo. Os processos de amonificação (passagem de N orgânico para NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e de nitrificação (passagem de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> para NO<sub>2</sub><sup>-</sup> para NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ocorrem geralmente acima da zona saturada, principalmente no solo, onde o conteúdo em matéria orgânica e em oxigénio é abundante.

A desnitrificação (passagem do estado de oxidação do nitrato, ou de NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, aos restantes estados mais reduzidos NO, N<sub>2</sub>O e N<sub>2</sub>), por seu lado, pode ocorrer na zona vadosa e na zona saturada do solo, em condições redutoras (Fig. 20). Os processos de desnitrificação originam a formação de gases para a atmosfera, pelo que contribuem para a emissão de gases com efeito de estufa, sendo a agricultura responsável pela produção de 65% das emissões totais de óxido nitroso em Portugal (PDR 2007-2013). Do ponto de vista da qualidade das águas este processo é desejável (e incentivado em processos de reabilitação de águas subterrâneas poluídas, cf. Leitão, 1997) na medida em que a libertação de azoto gasoso permite a redução de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> na água.

Os organismos responsáveis pela desnitrificação são bactérias heterotróficas ou autotróficas capazes de reduzir o azoto. As primeiras têm a sua fonte de energia na oxidação da matéria orgânica e as segundas em material inorgânico. A maioria das bactérias desnitrificadoras são heterotróficas, sendo capazes de utilizar diversos tipos de compostos carbónicos (Hiscock *et al.*, 1991), necessitando para o efeito de condições anaeróbias e de carbono assimilável.

O processo de mineralização pelas bactérias do solo facilita a conversão do azoto orgânico em

amónio e depois em nitrato e é um processo chave que determina o azoto disponível para as plantas, mas também para lixiviação.

Do conjunto de formas de azoto, o ião nitrato é aquele que é mais comum nas águas subterrâneas e também o que apresenta maior mobilidade na água. Esta propriedade deve-se à sua elevada solubilidade e à sua forma aniónica. O seu movimento nas águas subterrâneas processa-se sem transformações significativas e com baixo ou nulo retardamento (Freeze e Cherry, 1979). Os nitratos formam sais muito solúveis e, portanto, de difícil precipitação. Em ambientes com características de oxidação média ou alta é muito estável, migrando longas distâncias a partir da sua entrada no sistema (Freeze e Cherry, 1979). Estão neste tipo de condições os aquíferos livres cujas formações são permeáveis e as rochas intensamente fracturadas.

O ião amónio é facilmente adsorvido às partículas do solo pelo que o seu transporte principal é através da erosão do solo e arraste no escoamento superficial formado durante episódios de intensa precipitação.

Os níveis mais elevados de nitratos encontram-se a pequenas profundidades abaixo da superfície freática. À medida que a profundidade de amostragem aumenta decrescem as concentrações em nitratos (Mull *et al.*, 1991). O motivo deste comportamento deve-se, essencialmente, aos processos de biodegradação e ao tempo de permanência no subsolo. Os primeiros são responsáveis pela redução dos nitratos. O maior tempo de permanência para os nitratos nas águas subterrâneas resulta num aumento da possibilidade de reacção com a matéria orgânica tendo também como consequência a redução do nitrato.

A presença de  $\text{NO}_2^-$  e de  $\text{NH}_4^+$  nas águas é um sinal de pouca oxigenação o que pode indicar contaminação por matéria orgânica, nomeadamente proveniente de estrumes.

De acordo com os resultados obtidos no projecto FATE, entre 75% e 97% do N presente nos fertilizantes fica retido nos horizontes superficiais do solo ou é sujeito a desnitrificação, entre outros processos (Herbke *et al.*, 2005).

### 5.3.3.3 Fósforo

O fósforo não é um elemento perigoso na água para consumo humano, embora a sua presença nas águas subterrâneas seja indesejável dada a sua capacidade de, mesmo em pequenas concentrações (da ordem de algumas dezenas de  $\mu\text{g/l}$ , cf. Herbke *et al.* 2005), acelerar uma possível eutrofização dos meios aquáticos superficiais. Esta manifesta-se através da proliferação de algas azuis e verdes, pela redução da penetração da luz na massa de água, pela carência de oxigénio, pelo desaparecimento de invertebrados bênticos e pela produção de toxinas que são tóxicas para os peixes, animais e para o Homem.

A ocorrência e mobilidade do fósforo ganham assim especial relevo nas situações em que as águas subterrâneas alimentam o escoamento de base de massas de água superficiais, num processo que pode ser lento e dificilmente perceptível e cujos impactes e reabilitação são muito morosos.

O fósforo inorgânico dissolvido ocorre sob a forma de  $H_3PO_4$ ,  $H_2PO_4^-$ ,  $HPO_4^{2-}$  e  $PO_4^{3-}$ , pelo que a forma mais estável depende do pH do meio onde se insere. A carga negativa apresentada por estes compostos não favorece a sua adsorção às partículas do solo, embora a fraca solubilidade da grande maioria dos compostos de fosfato (por exemplo de cálcio) induza a sua precipitação para compostos de grande estabilidade. Deste modo, a migração de fósforo (essencialmente sob a forma de fosfato, ortofosfato) para as águas subterrâneas ocorre essencialmente em associação com a matéria orgânica e com as partículas de solo.

Em muitas situações, os solos permitem reter os compostos de fósforo, evitando a sua contaminação para as águas de jusante, dada a fraca mobilidade destas espécies. Contudo, o escoamento superficial e a erosão após intensos eventos de precipitação podem ser responsáveis pelo arraste de fósforo para massas de água superficial localizadas a jusante, aspectos que podem ser potenciados em áreas de relevo acentuado e com uma fácil conectividade entre a origem e o local de impacte.

Segundo Herbke *et al.* (2005), entre 94 a 100% do P aplicado fica retido nos horizontes mais superficiais do solo ou é removido no processo de colheita.

#### **5.3.3.4 Organismos patogénicos**

A presença de microrganismos patogénicos e de outros elementos orgânicos em áreas agrícolas é um assunto que tem merecido crescente atenção por parte dos responsáveis pelo planeamento e gestão de recursos hídricos. A utilização de estrumes, de águas residuais tratadas e de medicamentos administrados aos animais constituem formas de fertilização que potenciam a presença de microrganismos na água, tais como *Escherichia coli*, Salmonelas, Giardia, viroses, entre outros, responsáveis pelo aparecimento de infeções que vão desde gastroenterites e dermatoses até tétano e pneumonia. Associado à presença de estrumes podem surgir outras substâncias orgânicas, tais como disruptores endócrinos, com efeitos adversos para o crescimento, o desenvolvimento e a reprodução e que representam uma ameaça e risco a longo prazo para a saúde humana.

A migração de organismos patogénicos (bactérias, vírus e outros microrganismos) depende de diversos factores relacionados com o tipo de solo, o grau de humidade do solo, a intensidade da precipitação, a temperatura, o pH, as propriedades dos microrganismos, a presença de raízes de plantas, a topografia e as práticas agrícolas, entre outros aspectos (DEFRA, 2002).

### **5.3.3.5 Sólidos em suspensão ou sedimentos**

A presença de sólidos em suspensão na água ou de sedimentos refere-se ao material particulado que surge associado à água essencialmente como resultado da erosão do solo. Esta depende de vários factores relacionados com a topografia, a permeabilidade dos solos, intensidade da precipitação, entre outros. Para a qualidade das águas subterrâneas este parâmetro reveste-se de pouca importância na medida em que o solo constitui um filtro natural que retém a matéria em suspensão.

### **5.3.3.6 Pesticidas**

O uso de pesticidas pelos agricultores depende de uma multiplicidade de factores, tais como as condições climáticas, a sucessão e variedade das culturas, o risco de pestes e doenças, a relação custo do pesticida / preço de venda do produto, as políticas vigentes e as práticas de gestão do agricultor.

O conhecimento das pressões causadas pela presença de pesticidas na água é menor que o existente para os nutrientes, como resultado da variedade de tipos de pesticidas possíveis e do valor elevado das análises.

A concentração de pesticidas na água é, na maioria das situações, baixa, em parte devido ao facto de serem compostos geralmente pouco solúveis e em parte devido ao efeito de diluição. Contudo, a sua concentração na água, ainda que em pequenas quantidades, pode revelar-se bastante tóxica (não apenas para os organismos alvos) e a sua presença nos alimentos pode ter impactos negativos para o Homem e para os animais. Desse modo, as restrições de solubilidade nem sempre bastam para prevenir o seu aparecimento em concentrações significativas, em especial após a exposição a processos de lixiviação frequentes e de alta intensidade (Dores e De-Lamonica-Freire, 2001).

Alguns autores sintetizam nas suas pesquisas os factores que influenciam a dinâmica de pesticidas no ambiente, mostrando que é grande o grau de dificuldade na avaliação de riscos de contaminação de ambientes aquáticos decorrente do uso dessas substâncias, dada a grande quantidade de processos envolvidos nessa dinâmica (Dores e De-Lamonica-Freire, 2001). De entre os processos mais comuns refere-se a precipitação e a degradação químicas, a volatilização, a degradação e a retenção biológicas e a adsorção (Freeze and Cherry, 1979). A degradação biológica é talvez o processo mais importante de redução de pesticidas na zona vadosa do solo, local onde a presença de grandes quantidades de bactérias permite consumir e converter uma parte significativa dos compostos orgânicos.

Os pesticidas comportam enormes custos para o meio ambiente (contaminação das águas subterrâneas, perda da biodiversidade) e para a saúde humana (disrupção endócrina,

infertilidade, cancro) pelo que a internalização desses custos sociais e ambientais no preço final de todos os produtos agrícolas é essencial para o incentivo a práticas agrícolas livres de pesticidas. Segundo a OMS, os pesticidas estão a provocar anualmente, a nível mundial, doenças a 3 milhões de pessoas e a morte a cerca de 220 mil pessoas. Nesse contexto, há vários países onde a comercialização destes produtos está sujeita a autorizações restritas, aspecto que não impede a sua aquisição através de países com imposições menos restritivas.

### **5.3.4 Consequências da contaminação agrícola**

As três principais ameaças de degradação da qualidade dos solos e das águas subterrâneas resultantes da contaminação agrícola (Morris *et al.*, 2003) são:

- ◆ excesso de nutrientes (em especial azoto) aplicado para estimular o crescimento das culturas e que, inadvertidamente, é lixiviado para as águas subterrâneas;
- ◆ salinização dos solos causada pela inadequada gestão da irrigação; e
- ◆ risco de lixiviação de pesticidas.

Dessas três ameaças resultam os seguintes efeitos: a salinização, a alcalização e a toxicidade.

O processo de salinização está relacionado directamente com a acumulação de sais em excesso no solo devido à utilização de águas com alto teor em nutrientes, cloretos, carbonatos e bicarbonatos de sódio, cálcio e magnésio. A aplicação de fertilizantes orgânicos azotados como estrumes contribui igualmente para o aumento de nitratos, devido à nitrificação do amónio resultante da fermentação de compostos orgânicos, além de provocar contaminação microbiológica.

O azoto e o fósforo, nas suas diversas formas iónicas, são os componentes principais da contaminação de solos e água, e dos ecossistemas em geral, por excesso de nutrientes. Contribuem para a eutrofização dos ambientes aquáticos e para a concentração excessiva de compostos nítricos na atmosfera, ocasionada pela volatilização de gases, e na água, ocasionada pela lixiviação, enxurrada ou erosão. Outras consequências da aplicação de fertilizantes são os aumentos de iões, tais como cloretos, sulfatos, cálcio e magnésio que também fazem parte da sua composição.

Os solos localizados em regiões com solos com má-drenabilidade geralmente apresentam altos défices hídricos e, tendem a tornar-se salinos num período de tempo bastante curto, ainda que seja utilizada água de boa qualidade na irrigação. Se um dos sais presentes em elevadas concentrações for o sódio, trata-se então do problema, especialmente grave, da alcalização. Alguns solos virgens apresentam problemas de excesso de sais e sódio trocável enquanto que outros solos passam a apresentar problemas de salinidade somente após serem submetidos à irrigação. Em geral, esses problemas são causados por drenagem insuficiente, excesso de sais



na água de irrigação, altas taxas de evaporação, solos pouco profundos, entre outros aspectos.

Por outro lado, a possível ocorrência do nível freático próximo da superfície, e dependendo das características hidráulicas do solo, pode induzir o transporte de sais por ascensão capilar para a zona não-saturada, contribuindo para o aumento da concentração de sais que, de forma cíclica, podem voltar à água subterrânea por lixiviação.

Um aumento da concentração total de sais no solo aumenta o potencial osmótico da água do solo, obrigando as raízes a exercerem maior esforço para a absorção da água (e dos nutrientes), provocando condições de défice hídrico, podendo mesmo vir a impedir a absorção da água e o desenvolvimento vegetativo. Uma das consequências decorrentes do uso de águas nestas condições é o abaixamento da produção. O risco de salinização depende da concentração total de iões, que habitualmente se mede pela condutividade eléctrica (dS/m).

As culturas não respondem da mesma forma à salinidade podendo produzir rendimentos aceitáveis a níveis altos de salinidade ou ser sensíveis a níveis relativamente baixos. Por outro lado, a aplicação de fertilizantes pode compensar uma cultura onde haja excesso de sais, na medida em que o aumento da fertilização aumenta a tolerância à salinidade, mas a contaminação será aumentada devido aos fertilizantes adicionados.

O risco de alcalinidade é medido pela concentração total de  $Na^+$  (meq/l) na água relativamente à concentração do total dos catiões principais (cálcio e magnésio, meq/l), sendo habitualmente expresso pela relação de adsorção do sódio (RAS):

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

Teores relativamente altos de sódio, ou baixos de cálcio no solo e na água, favorecem a dispersão dos coloides argilosos, afectando desfavoravelmente a estrutura do solo, o que se reflecte na erodibilidade, na diminuição da capacidade de infiltração, promovendo o escoamento superficial. Dessa forma, não só a acumulação de sais interfere na movimentação da água, como também as concentrações de sódio em relação aos teores de cálcio e magnésio, em miliequivalente por litro.

Os elementos químicos que ficam acumulados no solo, são transportados, dissolvidos, em suspensão ou com os sedimentos resultantes do processo erosivo, para as linhas de água e reservatórios hídricos de superfície e lixiviados em direcção à superfície freática.

Cada um destes tipos de problemas (salinidade, alcalinidade) pode manifestar-se isoladamente. Porém, eles estão associados em maior ou menor grau. Com efeito, os riscos de alcalinização e de salinização são de tal maneira interactuantes que foram considerados em

conjunto por Ayers e Westcot (1987). A consideração conjunta dos dois parâmetros de qualidade resulta que o efeito de alcalinização de uma água com determinada RAS, traduzido no grau de redução que induz na capacidade de infiltração do solo, é tanto maior quanto menor for a salinidade da água (Fig. 21).

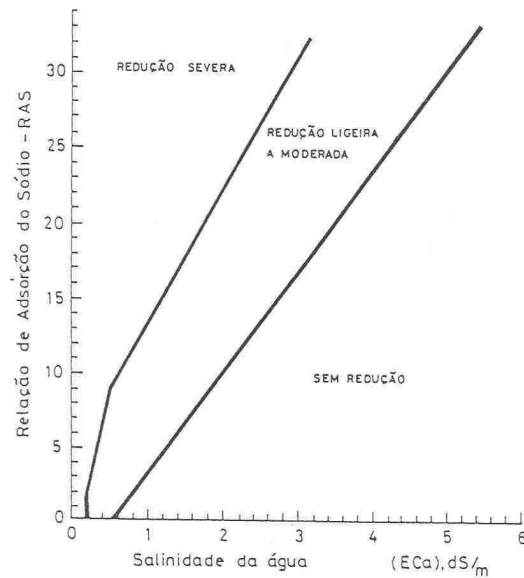


Fig. 21 - Redução relativa da infiltração por efeito conjunto da salinidade e de alcalinização da água de rega (modificado de Ayers e Westcot, 1987)

Além da concentração elevada em catiões, outro tipo de contaminação agrícola pode ser causada quando alguns iões do solo ou da água são absorvidos pelas plantas e acumulados nos seus tecidos em concentrações suficientemente altas para reduzir a produtividade, em função da sensibilidade da cultura ao ião, da ETP da região e do método de irrigação utilizado (Bernardo, 1995).

Os iões de cloro, sódio e boro são principalmente avaliados para caracterização da toxicidade que, por sua vez, acompanham e contribuem para o aumento dos problemas com alcalinização e/ou salinidade do solo. Os iões de cloro e sódio são usualmente encontrados em concentrações relevantes na água de irrigação e são absorvidos pelas raízes, movimentados pelo caule até as folhas, ou de forma directa até às folhas através da irrigação por aspersão. Os bicarbonatos também devem ser citados como problema quando em concentrações elevadas.

#### 5.4 Caracterização da contaminação difusa em Portugal e das zonas vulneráveis

A carga poluente de origem difusa foi estimada para Portugal Continental com base nos diversos trabalhos desenvolvidos no âmbito dos planos de bacia hidrográfica, para as duas

substâncias mais comuns da contaminação agropecuária: azoto e fósforo total (Guerreiro e Pereira, 2002). As autoras referem que a estimativa apresentada foi efectuada com abordagens que contemplam a utilização de taxas de exportação de nutrientes, embora se refira também o recurso a modelos que incorporam, entre outros aspectos, as características dos solos e das culturas, as quantidades de aplicação de fertilizantes, as capacidades de retenção de fertilizantes pelas culturas e as características climáticas.

A carga total de N-total estimada para a totalidade do território de Portugal Continental é de cerca de 1,81 kg/ha/ano e a de P-total de 0,3 kg/ha/ano (Guerreiro e Pereira, 2002). O mapa da Fig. 22 apresenta a distribuição espacial da carga poluente de origem difusa para Portugal Continental.

A forma como os contaminantes identificados e quantificados entram no meio subterrâneo depende das características da bacia onde se insere. No âmbito do PNA (2002) foi utilizada uma metodologia expedita para identificar os sistemas aquíferos mais susceptíveis à contaminação por nitratos de origem agrícola, com os seguintes passos principais:

- ◆ Identificação das áreas regadas;
- ◆ Identificação da área do aquífero com regadio;
- ◆ Identificação das áreas mais vulneráveis do aquífero que contém regadio;
- ◆ Identificação das zonas de risco à contaminação por nitratos.

As áreas com maior susceptibilidade de as águas subterrâneas virem a ser contaminadas por nitratos de origem agrícola, isto se se praticarem aí utilizações intensivas de fertilizantes ou de outro tipo de produtos, correspondem às zonas mais vulneráveis em áreas de regadio localizadas em zonas com aquíferos.



difusa originada pela actividade agrícola: Aluviões do Tejo; Aluviões de Constância; Aluviões de Abrantes; Bacia do Tejo-Sado Margem Esquerda; Quaternário de Aveiro, Elvas - Vila Boim; Estremoz-Cano, Escusa e Gabros de Beja.

Mais tarde, no âmbito do Relatório Síntese sobre a Caracterização das Regiões Hidrográficas prevista na Directiva-Quadro da Água (INAG, 2005) considerou que existem 62 (de 91) massas de águas subterrâneas com pressões significativas em termos de fontes de contaminação difusa, nas regiões hidrográficas de Portugal Continental, sendo o nitrato o poluente mais significativo.

Relativamente à qualidade da água, o Decreto-Lei n.º 235/97, de 3 de Setembro, relativo à protecção das águas contra a contaminação causada por nitratos de origem agrícola, determina que os estados-membros designem as zonas que drenam para as águas poluídas ou susceptíveis de o serem, por nitratos de origem agrícola, como "Zonas Vulneráveis", com base nos resultados dos requisitos de monitorização estabelecidos na directiva.

Portugal identificou, com base nos dados disponíveis e na metodologia adoptada, um conjunto de sistemas aquíferos e de formações sedimentares como estando poluídos (Fig. 23), oito zonas vulneráveis no Continente (Fig. 24) e oito na Região Autónoma dos Açores (coincidentes com as bacias hidrográficas de oito lagoas que, não obstante apresentarem valores de nitratos muito baixos (maioritariamente inferiores a 1 mgN/l), se encontram em estado de eutrofização), através da Portaria n.º 833/2005, de 16 de Setembro e da Portaria n.º 1100/2004, de 3 de Setembro. Na Região Autónoma da Madeira não foram identificadas quaisquer águas poluídas por nitratos (PDR 2007-2017).

As oito zonas referidas para o Continente representam 3% da SAU e 1,1% do território Continental, sendo a média europeia 40,9% dos territórios dos estados-membros (PDR 2007-2013). Segundo a mesma fonte de dados, o balanço bruto de nutrientes indica valores de azoto de 42,5 kg/ha, inferiores à média da UE (55 kg/ha).

Estes dados colocam, aparentemente, Portugal numa boa posição nestes indicadores, embora a metodologia e filosofia subjacentes à declaração das zonas vulneráveis tenha sido muito diversa nos diversos países da Europa. Assim, a maioria dos países do Norte da Europa declararam como zonas vulneráveis não apenas as áreas poluídas mas também as áreas em risco de virem a ficar poluídas caso se mantivessem as actuais práticas, facto que conduziu à declaração de extensas áreas do território como vulneráveis. Esta atitude encerra uma perspectiva de precaucionaridade uma vez que a declaração de uma área como vulnerável implica uma alteração das práticas agrícolas para melhores procedimentos definidos no Código de Boas Práticas Agrícolas. Esta opção evitará certamente a necessidade de declarar novas zonas vulneráveis num futuro a médio prazo.

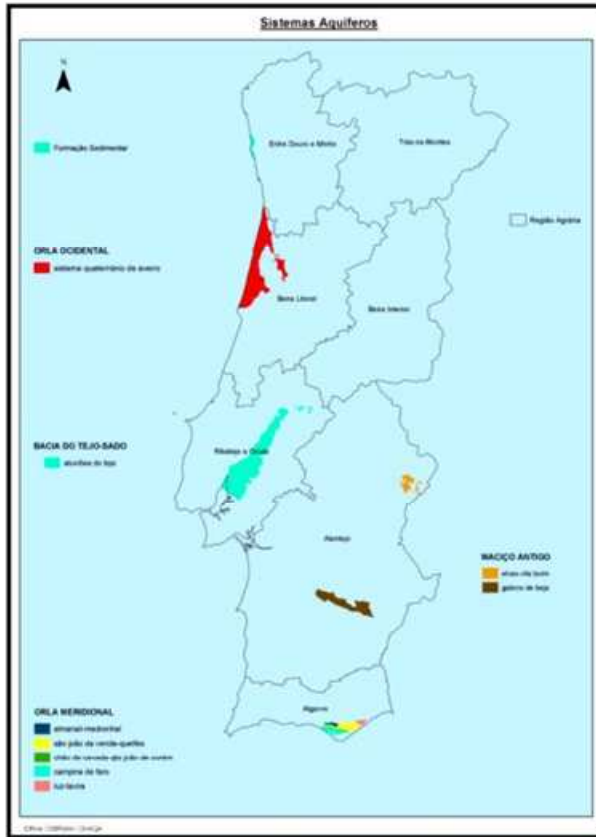


Fig. 23 - Mapa dos sistemas aquíferos e formações sedimentares identificados como estando poluídos (cf. <http://www.idrha.min-agricultura.pt/hidrologia/aquiferos/index.htm#>)



Fig. 24 - Mapa das oito zonas vulneráveis no Continente (cf. <http://www.idrha.min-agricultura.pt/hidrologia/aquiferos/index.htm#>)

No âmbito do processo de análise e revisão da lista de zonas vulneráveis imposto pelo referido Decreto-Lei, foram mais recentemente analisados os 58 sistemas aquíferos quanto ao risco de contaminação agrícola tendo sido definidos quatro novos sistemas aquíferos como potenciais zonas de risco e susceptíveis de se identificarem como zonas vulneráveis (Fig. 25).

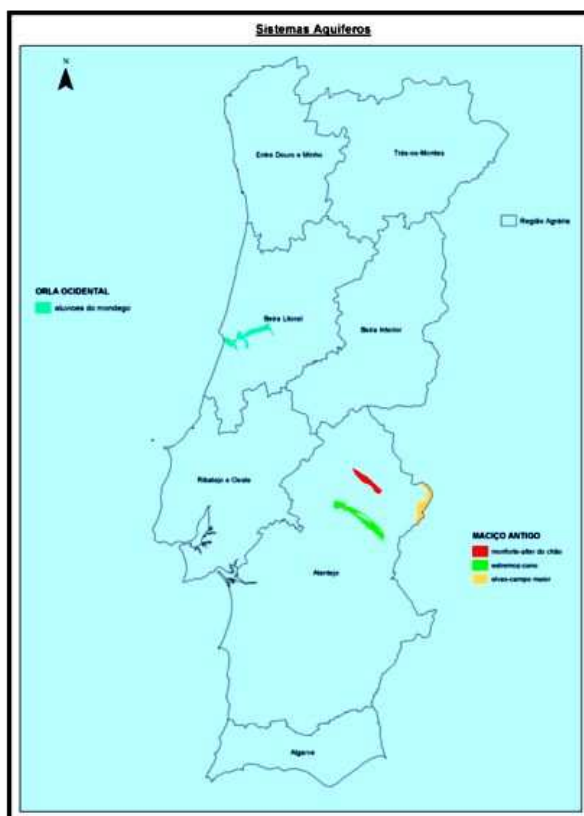


Fig. 25 - Mapa dos sistemas aquíferos definidos como potenciais zonas de risco e susceptíveis de se identificarem como zonas vulneráveis (cf. <http://www.idrha.min-agricultura.pt/hidrologia/aquiferos/index.htm#>)

Ainda no sentido de dar cumprimento às obrigações do Estado português perante a UE, no âmbito do estipulado nas directivas comunitárias e na legislação nacional com implicações na qualidade da água, foram elaborados relatórios de situação, e planos e programas estratégicos e de acção para cada uma das zonas vulneráveis. O "Relatório sobre a Contaminação provocada por Nitratos de Origem Agrícola - Dezembro de 2000", dá cumprimento ao estabelecido no artigo 10.º da Directiva n.º 91/676/CE, apresentando as medidas preventivas e os programas de acção tomados no sentido de assegurar um nível geral de protecção de todas as águas contra a contaminação causada ou induzida por nitratos.

## 5.5 Medidas de minimização e controlo da contaminação

O reconhecimento da complexa e estreita interligação entre a agricultura e o ambiente conduziu ao progressivo desenvolvimento de novas políticas públicas, nomeadamente a nível comunitário e sobretudo a partir de 1992, visando dar uma resposta coerente aos desafios do ordenamento dos espaços rurais, da sustentabilidade ambiental e da viabilidade económica da agricultura, de forma a envolver uma abordagem territorial que valorize a multifuncionalidade da agricultura e a diversificação das opções de ocupação de território.

As medidas de minimização e controlo da contaminação estão bem estruturadas no País em diversos planos nacionais, com especial destaque para o Plano Estratégico Nacional do Desenvolvimento Rural (PDR, 2007-2013) e para o Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (PNUEA, 2001), embora o mesmo não se possa dizer da prática da sua implementação. As medidas adoptadas tendo em vista a minimização e o controlo da contaminação de origem agrícola são muito diversas, embora assentem em três pilares fundamentais:

- ◆ a redução do uso de fertilizantes e pesticidas;
- ◆ a redução da mobilização de fertilizantes e pesticidas através da adequação da forma e época de aplicação, atendendo às dotações de água requeridas pelas culturas;
- ◆ a adopção de medidas que permitam interceptar os contaminantes antes da sua eventual descarga para meios mais sensíveis.

Em Tavares (2007) destacam-se um conjunto de legislações e de programas onde o controlo e a minimização são contemplados:

- ◆ aplicação do Código de Boas Práticas Agrícolas;
- ◆ aplicação de Programas de Acção (Zonas Vulneráveis);
- ◆ faseamento da aplicação de fertilizantes;
- ◆ aumento da eficiência de rega;
- ◆ legislação sobre a deposição de lamas de depuração em solos agrícolas;
- ◆ legislação sobre controlo e utilização dos produtos fitofarmacêuticos;
- ◆ legislação sobre eliminação adequada de resíduos e embalagens de produtos fitofarmacêuticos;
- ◆ legislação sobre o licenciamento de boviniculturas.

O recentemente editado PDR (2007-2013) preconiza um conjunto de práticas culturais e de gestão a adoptar para proteger o recurso água entre os quais se refere:

- ◆ usar produtos fitofarmacêuticos permitidos no Regulamento do Modo de Protecção Biológico ou recomendados pela protecção integrada;
- ◆ gerir adequadamente o equipamento de aplicação de fitofármacos, e armazenagem de estrumes;
- ◆ não aplicar azoto nas culturas extremas de leguminosas;
- ◆ fazer análises de terra, material vegetal e água de rega e usar as fertilizações aconselhadas nas recomendações;
- ◆ manter o equipamento de transporte e aplicação da água em bom estado de manutenção;
- ◆ assegurar a disponibilidade de água às culturas de acordo com os avisos de rega ou os balanços hídricos;
- ◆ aplicar válvulas anti-retorno no sistema de rega;
- ◆ selar estruturas hidráulicas (furo, poço, charca) que por serem improdutivo, mal



construídos ou deteriorados não permitem a captação de água subterrânea.

O mesmo documento refere a "necessidade de prosseguir uma política de suporte às infra-estruturas de regadio que se baseie numa utilização mais racional do recurso água em coerência com os princípios orientadores e objectivos da Directiva-Quadro da Água transpostos para o Plano Nacional da Água e para o Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (PNUEA, 2001). Estes princípios serão aplicados, de forma coerente e integrada, a infra-estruturas públicas e privadas" de forma a melhorar a actual eficiência de utilização da água que é de cerca de 58% (a eficiência é determinada pelo quociente entre a procura efectiva total de 3800 hm<sup>3</sup>/ano e o actual consumo útil total em 6551 hm<sup>3</sup>/ano). Refere, ainda, no que "respeita à gestão equilibrada dos recursos hídricos prosseguir-se-á uma política de irrigação conducente à diminuição da pressão sobre o recurso água especialmente no tocante às águas subterrâneas, através do estímulo ao uso mais eficiente da água e às práticas agrícolas mais sustentáveis". Tendo em conta as perspectivas de evolução em termos de procedimentos dos utilizadores e de evolução tecnológica dos equipamentos, propõe-se atingir a 10 anos uma eficiência de utilização da água de 66%.

Estima-se que a reconversão dos métodos de rega, por exemplo da rega por gravidade para sistemas sob pressão, como forma de aumentar a eficiência de rega, tendo por objectivo o uso mais eficiente da água, venha a trazer ganhos expectáveis de 50 - 60% para 70 - 80%. Também a redução das perdas ocorridas no armazenamento, transporte e distribuição deverá concretizar-se pela intervenção física nas infra-estruturas e pela utilização de novas tecnologias. A redução das perdas na aplicação está dependente ainda, da introdução de sistemas de aviso e agrometeorológicos e da adopção de técnicas adequadas cuja descrição exhaustiva pode ser consultada em PNUEA (2001).

Como seria de esperar, este conjunto de recomendações tendentes a proteger a qualidade dos solos e das águas, tem custos para a própria agricultura que advêm, entre outros aspectos da (PDR 2007-2013):

- ◆ alteração das práticas agrícolas;
- ◆ diminuição da produtividade por redução de aplicação de fertilizantes e de produtos fitofarmacêuticos;
- ◆ necessidade de fazer rotação de culturas;
- ◆ necessidade de alterar o uso do solo (ex: pastagem para floresta);
- ◆ necessidade de usar outros métodos, de maior custo, de combate às infestantes (menor risco para o ambiente);
- ◆ necessidade de construção de melhores estruturas de armazenamento de fitofármacos, fertilizantes, etc.;
- ◆ necessidade de gestão e armazenamento de efluentes zootécnicos (ex. suiniculturas);
- ◆ reabilitação dos perímetros/sistemas de rega.

No âmbito mundial, estudos recentes comprovam a necessidade da aplicação de uma prática regulatória da inserção destes usos no meio ambiente, de forma que atenda as necessidades de protecção das culturas aos agentes perturbadores, mas que simultaneamente garanta a protecção dos recursos naturais envolvidos.

Na União Europeia, apesar da legislação comum fazer um apelo cada vez maior a práticas agrícolas sustentáveis, como a agricultura extensiva e biológica, a agricultura intensiva assente em pesticidas é positivamente discriminada (só em 1999 foram utilizadas 327000 toneladas de pesticidas na agricultura europeia). Assim, embora reconhecendo por exemplo a utilidade dos pesticidas no controlo das pragas, os seus efeitos para a saúde humana e para o ambiente exigem a implementação de métodos alternativos ou, pelo menos, de uma utilização fortemente limitada e controlada.

## 5.6 Principais conclusões de projectos neste domínio

A posição nuclear da agricultura na gestão dos recursos solo e água é enfatizada no âmbito do 6.º programa comunitário em matéria de ambiente e, em particular, no quadro de duas estratégias focadas na conservação desses recursos. É elucidativo que, num total de oito, as seguintes seis grandes ameaças à conservação do solo identificadas na estratégia temática de protecção do solo tenham relação directa com a agricultura: erosão; diminuição da matéria orgânica; contaminação difusa; compactação; diminuição da biodiversidade; salinização (PNPOT, 2006).

Na óptica da conservação da natureza e da biodiversidade, a agricultura surge também como uma realidade incontornável dado que grande parte dos ecossistemas e das espécies a preservar dependem quer da manutenção de sistemas de agricultura com elevado valor natural, quer do controlo e mitigação de relações de potencial conflitualidade entre certas práticas agrícolas e os objectivos de conservação.

O conjunto dos principais projectos europeus desenvolvidos nos últimos anos no âmbito da inteligência entre a DQA e a agricultura é sistematizado num relatório de 2005 (Dworak *et al.*, 2005). Nesta secção apresenta-se uma breve síntese dos resultados alcançados nos principais projectos.

**PEGASE** (*Pesticides in European groundwaters: detailed study of representative aquifers and simulation of possible evolution scenarios* - EU contract EVK1-CT1999-00028, 2000-2004, <http://www.eugris.info/displayProject.asp?ProjectID=4306&Aw=PEGASE&Cat=Project>).

Os **objectivos do projecto** desenvolvido por 11 organismos de investigação, em 8 países europeus (não incluindo Portugal), foram: "To study representative aquifers (six contrasted aquifers representative of European GW resources: from a sandy aquifer with a GW table < 2 m

below ground level to a 50 km<sup>2</sup> karst aquifer with GW at >10 m depth) to:

- characterise the presence and transfer of pesticides from the soil surface to groundwater in a number of locations representative of European aquifers;
- elucidate transport processes from the soil surface to and in groundwater; and
- develop advanced tools (deterministic mathematical models, but also socio-economic instruments) supporting the management of pesticide usage with regard to the sustainable management of groundwater quality.

The extensive monitoring and characterisation of water flow and pesticide transport, which covered the root, unsaturated and saturated zones, supported the development, refinement and evaluation of the modelling tools.

A significant amount of work within PEGASE was dedicated to the refinement and improvement of modelling tools in an effort to further the capabilities of models in the simulation of pesticides to and in the groundwater. This involved: i) the refinement of root zone models; ii) the coupling of models, e.g. models simulating water and pesticide fluxes in the root zone and groundwater models; and iii) the addition of new subroutines to integrated models thereby allowing the simulation of water transport and pesticide fluxes from the soil surface to and in the groundwater.

Alternative scenarios for pesticide management strategies implemented within a software tool (PEG@SE) have been evaluated through interactive demonstrations. The project is of direct interest to the WFD programme of measures as well as to the Plant Protection Products Directive".

Os principais **resultados do projecto** são seguidamente referidos.

The filed monitoring exercise demonstrated that:

- there is a potential for significant and rapid transport of selected pesticides to depth under unfavourable climatic conditions (*i.e.* significant rainfall events shortly after application);
- except for selected compounds which were found throughout the year (*e.g.* atrazine, deethylatrazine), detections of pesticides in groundwater were generally limited to a few weeks following application; and
- concentrations of pesticides in aquifers are very variable in space and time.

Laboratory experiments undertaken in the project suggested that there is a significant potential for sorption and degradation of selected pesticides in aerobic aquifers. This natural remediation process has rarely been reported before and could form the basis of a long-term management strategy for groundwater quality.

A range of advanced modelling tools enabling the simulation of the fate of pesticides from the soil surface to and in the groundwater have been developed, although further evaluation of the models is required. Mechanistic or semi-empirical tools were developed for the modelling of pesticide contamination in GW at various spatial scales. Approaches investigated included the refinement of a screening tool (PESTGW) and 1D root zone models (MACRO and ANSWERS), the addition of pesticide fate and crop subroutines in integrated models (thereby allowing the prediction of pesticide fate in the soil-unsaturated zone-saturated zone continuum; MARTHE, TRACE and POWER) and the coupling of different models (e.g. MACRO+MODFLOW, ANSWERS+MODFLOW). The numerics of the models were upgraded within the framework of the project, which allows the future deployment of advanced modelling activities, such as automated calibration against field data or sensitivity and uncertainty analyses.

Alternative management scenarios to ensure the sustainability of groundwater in relation to quality issues were developed on the basis of the driving forces and solutions envisaged for pesticide management strategies. These scenarios were implemented within a software tool referred to as 'PEG@SE'. The system is designed to create a bridge between scientific and non-scientific knowledge, integrating technical, scientific and social information in a single tool.

A number of recommendations with regard to sampling schemes and data collection have been made to support the design of future groundwater monitoring activities. On aspect which should be researched is the connection between preferential flow phenomena in soil and flow processes in the unsaturated and saturated zones. The significant contribution of preferential flow to the presence of pesticides at the bottom of soil profiles has been established, but little is known about the fate of these 'hot spots' in the deeper environment and hence the overall contribution of preferential flow phenomena to the contamination of European aquifers by pesticides.

**FOOTPRINT** (*Creating tools for pesticide risk assessment and management in Europe*, EU contract n.º 22704, 2006 - 2009, [www.eu-footprint.org](http://www.eu-footprint.org))

O **objectivo do projecto** desenvolvido por 15 organismos de investigação, em 9 países europeus (não incluindo Portugal), foi: to develop a set of 3 computer tools that will allow users to:

- ◆ identify the dominant pathways and sources of pesticide contamination in the agricultural landscape;
- ◆ estimate levels of pesticide concentrations in surface water and groundwater;
- ◆ make scientifically-based assessments of how the implementation of risk reduction strategies is likely to reduce pesticide contamination of water resources.

The operational goals of the project are therefore:

- ◆ to develop a suite of 3 pesticide risk assessment and management tools, for use by three different user communities:

- farmers and extension advisors at the local (farm) scale;
  - water managers at the catchment scale;
  - and policy makers/registration authorities at the national/EU scale.
- ◆ to evaluate the usability and performance of the FOOT tools through piloting and evaluation studies at their various scales of application.

Os principais **resultados deste projecto**, em curso, permitirão:

- ◆ the identification of those areas in the agricultural landscape that most contribute to the contamination of water resources by pesticides;
- ◆ the estimation of the levels of pesticide contamination in water resources to be made.

In addition, they will provide site-specific recommendations on how to reduce the transfer of pesticides to water resources.

The 3 tools will be evaluated within the context of the project through a programme of piloting and evaluation tests at the field and farm catchment scales. Although the 3 tools will be working at different scales and will be very different in their presentation, they will share the same overall philosophy and underlying science and will therefore provide a coherent and integrated solution to pesticide risk assessment and risk reduction from the scale of the farm to the EU scale.

The software applications will be designed to meet the expectations of stakeholders and future users and will therefore integrate different approaches to risk assessment and modelling depending on the target user community. The relevance of the tools developed to the expectations of the target end-user communities will be ascertained through the feedback provided by the members of the Advisory Committee.

**AgriBMPwater** (*System approach to environmentally acceptable farming*, EU contract EVK1-CT-1999-00025, 2000 – 2004, <http://www.bordeaux.cemagref.fr/public/agribmpwater/index.html>, 5<sup>th</sup> Framework programme).

O **objectivo do projecto** desenvolvido por 10 organismos de investigação, em 5 países europeus (não incluindo Portugal), foi: to provide planners in charge of the implementation of Best Management Practices (BMPs) to mitigate Non Point Source pollution of water with 1) a guideline allowing the definition of critical areas on which efforts should be placed in priority, and 2) a selection grid permitting the assessment of BMPs in a three-dimensional space defined by environmental effectiveness, associated economic costs and social acceptability by farmers and land managers. A comparison between different management plans is carried out through a cost/effectiveness assessment, along with a study of their acceptability by farmers (focusing on nitrate loads). This project is more focused on the Nitrates Directive but it has an indirect relevance to groundwater policy.

A comparison between different existing or simulated BMPs will be carried out through a

cost/effectiveness assessment along with the study of their acceptability by farmers. Effectiveness will be assessed as the evolution of water quality resulting from BMPs' implementation in experimental watersheds. Particular efforts will be carried out to improve BMPs representation in hydrological models, as they can take various forms (landscape structures, agronomic recommendations). Spatial modelling, at various scales, will be used to define critical areas where efforts should be concentrated.

As for costs, efforts will concern the evaluation of both direct and indirect costs induced by BMPs implementation. When studying diffuse pollution, individual contributions and de-pollution costs are not known and have to be assessed. Direct costs will therefore be estimated through the definition of contract menus in a Principal/Agent modelling framework. Indirect costs will be estimated as the impact of BMPs on all other branches of the economy with the use of a general equilibrium model. A cost/effectiveness ratio will be calculated for each studied BMP, allowing a comparison of possible alternatives.

Concerning the application of results and BMPs it was recognized that unfortunately farmers do not apply BMPs as would be desirable. Possible explanations are that of their low environmental commitment and insufficient implementation practices. Extensive interviews will be carried out to account for the social dimension of farmers' decision-making process. In addition, complementary interviews with land managers will help finding out what are the implementation practices used and problems encountered. This will aim at defining new negotiative implementation methods which will be evaluated in a demonstration project involving both local land managers and farmers.

Os principais **resultados do projecto** foram referidos como:

Expected results should contribute to help Member States choosing the most appropriate measures and ways for an efficient implementation of BMPs, with the support of scientifically validated technical and economic recommendations, thus contributing to various EU policies such as CAP, Instruction 91/676/CEE, Instruction 80/778/CEE, and more generally the European water policy.

Short term results will consist in a potential cost/effectiveness ratio. Based on the experience of case studies, the project will provide a methodological guideline designed to assess BMPs on the three dimensions of effectiveness, cost and acceptability. The expected selection grid should contribute to building a decision support tool both for the EU to implement the eco-conditionality regulation, and, at a local scale, for land managers and local planners to face water resource management related issues.

**SOWA** (*Integrated soil and water protection from diffuse pollution*, EU contract EVK1-CT-2002-80022, 2003-2005, <http://www.uni-tuebingen.de/sowa/sites/index.htm>, 5<sup>th</sup> Framework programme).

O **objectivo do projecto** desenvolvido por 10 organismos de investigação, em 8 países europeus (não incluindo Portugal), foi:

SOWA aims at the integration of soil and water research in Europe. The thematic focus is set on large scale *i.e.* diffuse pollution of soils from *e.g.* atmospheric deposition and agricultural practices and the associated risk of groundwater pollution.

The objective is to pull together the critical mass needed in order to integrate available and emerging scientific knowledge from various disciplines such as soil science, soil chemistry, soil physics, hydrogeology, water resources, agriculture, atmospheric deposition of pollutants, environmental analysis and engineering as well as management and remediation of contaminated soil and groundwater.

SOWA provides a multidisciplinary forum for the identification of research needs and strategies for integrated soil and water protection. The research needs and strategies are identified in five thematic working groups which focus on the different aspects of integrated soil and water protection:

- ◆ inventory of priority compounds and trends;
- ◆ screening and monitoring tools at different scales;
- ◆ chemical and physical processes in the unsaturated zone;
- ◆ heterogeneity and scale issues in soil and groundwater;
- ◆ diffuse soil and groundwater pollution by agricultural practises: remediation and management options.

Os principais **resultados do projecto** foram referidos como:

SOWA has brought new input into the discussion of diffuse pollution and its effects on soil, water, and ecosystems. SOWA supported the integration of disciplines working in soil and water research and provided a platform to:

- ◆ evaluate especially large scale soil pollution which will potentially damage important soil functions (such as the buffering, filtering, transformation capacity) and the soil ecology;
- ◆ increase the awareness of the risks of diffuse soil pollution, which pose a risk of long-term contamination of the water cycle (by workshops, publications, conference presentations, press releases);
- ◆ help to bridge the wide gaps by integrating soil and water related research, regulation and policy making throughout the EU;
- ◆ identify tools and procedures for low cost screening and contaminant analysis, soil characterisation methods, and management of soil/water contamination in Europe.

## 5.7 Necessidades de investigação

O conhecimento sobre o transporte, destino e impactes dos contaminantes mais comuns da contaminação difusa aumentou muito significativamente nas últimas décadas. Por outro lado, o aumento da capacidade de computação dos últimos 20 anos veio possibilitar uma melhoria da modelação hidrológica e hidrogeológica, permitindo, entre outros aspectos, estimar perdas de nutrientes à escala da bacia hidrográfica quando a informação existente é suficientemente precisa.

Contudo, falha a compreensão quantitativa do sistema solo - água, necessária para uma adequada gestão integrada ao nível da bacia hidrográfica, como resultado da complexidade deste sistema, para diferentes escalas espaciais e temporais.

Por outro lado, as novas substâncias químicas que são continuamente introduzidas podem vir a constituir novos "contaminantes emergentes", que muitas vezes pertencem a POPs (Contaminantes Orgânicos Persistentes que se caracterizam pelas suas propriedades de persistência, bioacumulação e toxicidade), com potenciais efeitos adversos para a saúde humana e para os ecossistemas mais vulneráveis.

A análise do risco de contaminação necessita de um conhecimento aprofundado sobre a capacidade do solo funcionar como um reservatório de contaminantes orgânicos e inorgânicos sem perder as suas capacidades de produzir biomassa e ser a base de suporte à biodiversidade. Contudo, remanescem muitas incertezas sobre os processos de mineralização e de metabolismo orgânico. Os elementos inorgânicos também apresentam incógnitas sobre os processos de longo prazo da sua imobilização desconhecendo-se em detalhe se a difusão de elementos, p.e. metais pesados, poderá integrar a longo prazo a estrutura dos minerais do solo ou de matéria orgânica em decomposição. Este conhecimento é de grande importância para a compreensão da capacidade de longo prazo para a imobilização de contaminantes.

Solos com características diferentes reagem de diferente forma a processos semelhantes de contaminação, não só como resultado de uma diferente dinâmica de movimento do fluxo mas também porque dependem da existência de determinados componentes reactivos aí presentes. A forma adequada de monitorização, em termos de escala espacial e temporal, dos diferentes parâmetros que podem ser relevantes para os processos de lixiviação dificilmente é a mais adequada para todos os parâmetros em simultâneo.

Um outro aspecto que merece investigação prende-se com a determinação de que traçadores ambientais deverão ser utilizados para uma melhor compreensão do sistema solo - água.

A complexidade dos sistemas solo - água, e as suas reacções com efeitos a longo prazo, requer que seja adoptada uma política pró-activa que ponha de parte o sistema clássico em que a necessidade de implementação de medidas para corrigir determinadas situações é



aferida em função da comparação de resultados de monitorização com valores standard de concentração de substâncias no ambiente. Em muitos casos essas medidas são tomadas demasiado tarde. Os padrões de qualidade são ferramentas de auxílio à gestão e tomada de decisão de gestores locais e não um fim em si mesmo. Importa, por isso, implementar uma gestão pró-activa com base no conhecimento do sistema natural bem como na análise socioeconómica que as várias opções de uso do solo e dos recursos hídricos podem ter.

Finalmente, um outro aspecto onde é necessário o aprofundamento de conhecimentos é a influência que as alterações climáticas poderão ter no uso do solo e de que forma é que essas alterações vão influir no seu funcionamento.

A escala global verificada para fenómenos de contaminação difusa juntamente com o crescente número de substâncias que são detectadas a diversas distâncias da origem, e em períodos de tempo muito diversos, implica que se conheça melhor o papel que solos, em especial os já poluídos, podem ter como filtros e atenuadores da contaminação no ciclo da água. Os solos são, por isso, um elemento-chave da preservação da qualidade da água subterrânea, de superfície e, em última análise, da qualidade da água para consumo humano e para os ecossistemas. Esta visão holística e integrada dos subsistemas solos e água, no contexto do planeamento e da gestão a nível da bacia hidrográfica, é fundamental para a prevenção e controlo da contaminação e para mitigar os impactes da contaminação nos ecossistemas associados, a diferentes escalas.

Nas Secções 10.5 e 10.4 propõe-se duas linhas de investigação neste contexto, incluindo a poluição agrícola e a originada por campos de golfe irrigados com águas residuais tratadas.





## **6 PREVENÇÃO DOS EFEITOS DA CONTAMINAÇÃO PROVENIENTE DE ESTRADAS E DE AEROPORTOS**

---

### **6.1 Introdução**

O progresso do sector dos transportes e o aumento da qualidade dos serviços de comunicação constituem duas linhas de acção estratégica do País, traçadas em 2006, através do Programa de Acção do Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território (PNPOT PA, 2006). O conjunto de acções previstas no sentido de *melhorar os sistemas e infra-estruturas de suporte à conectividade internacional de Portugal no quadro ibérico, europeu e global* inclui a implementação sustentável do Plano Rodoviário Nacional, a construção de uma nova rede ferroviária de alta velocidade, a modernização da rede ferroviária convencional, e a expansão e melhoria das infra-estruturas aeroportuárias, nomeadamente com a construção de um novo aeroporto de Lisboa, entre outras acções.

Este conjunto de infra-estruturas de transportes e de comunicações, de inegável interesse para o desenvolvimento e para a economia, permitindo corrigir assimetrias regionais, serve para o transporte de pessoas e bens, mas contraditória e simultaneamente formam uma barreira ao movimento de pessoas, de animais e da água no contexto da paisagem, e influencia o ambiente natural de forma complexa.

Do ponto de vista dos recursos hídricos, uma estrada ou uma infra-estrutura aeroportuária interrompem, em diversas secções ou troços, o regime natural do escoamento superficial. Por outro lado, os materiais que constituem as infra-estruturas vêm substituir os solos existentes no local gerando um comportamento diferente em termos hidrológicos, com diminuição da recarga natural e, nalguns casos em que os aquíferos são superficiais, alteração da própria geometria dos aquíferos.

Por outro lado, do ponto de vista da qualidade, há um conjunto de contaminantes que são gerados pelas estradas, pelos aeroportos e pelo tráfego associado (cf. Secção 6.3) cuja libertação para o ambiente se faz através do transporte aéreo, da percolação através do próprio pavimento (Folkesson *et al.*, 2008) e, essencialmente, através das águas de escorrência das estradas. Uma parte desses contaminantes fica retida junto às estradas acumulando-se na vegetação e nos solos contíguos. Os contaminantes que são transportados pelas águas de escorrência de estradas e outras superfícies pavimentadas (e.g. aeroportos) constituem focos significativos de contaminação difusa nas áreas onde se processa a sua descarga, quando não há tratamento prévio, e constituem o mais importante processo de transporte dos contaminantes.

Importa que o desenvolvimento do País, também neste domínio das infra-estruturas rodoviárias e aeroportuárias, assente num desenvolvimento ambientalmente sustentável. Nesse contexto, importa saber quais as actuais pressões exercidas pela rede viária do País e as perspectivas das futuras. Nesse contexto, apresenta-se uma breve análise das principais origens de contaminação que podem ser geradas neste tipo de infra-estruturas, a forma como se pode processar a sua dispersão no ambiente hídrico envolvente e os possíveis processos para minimizar essa contaminação em locais mais sensíveis através da implementação de infra-estruturas adequadas.

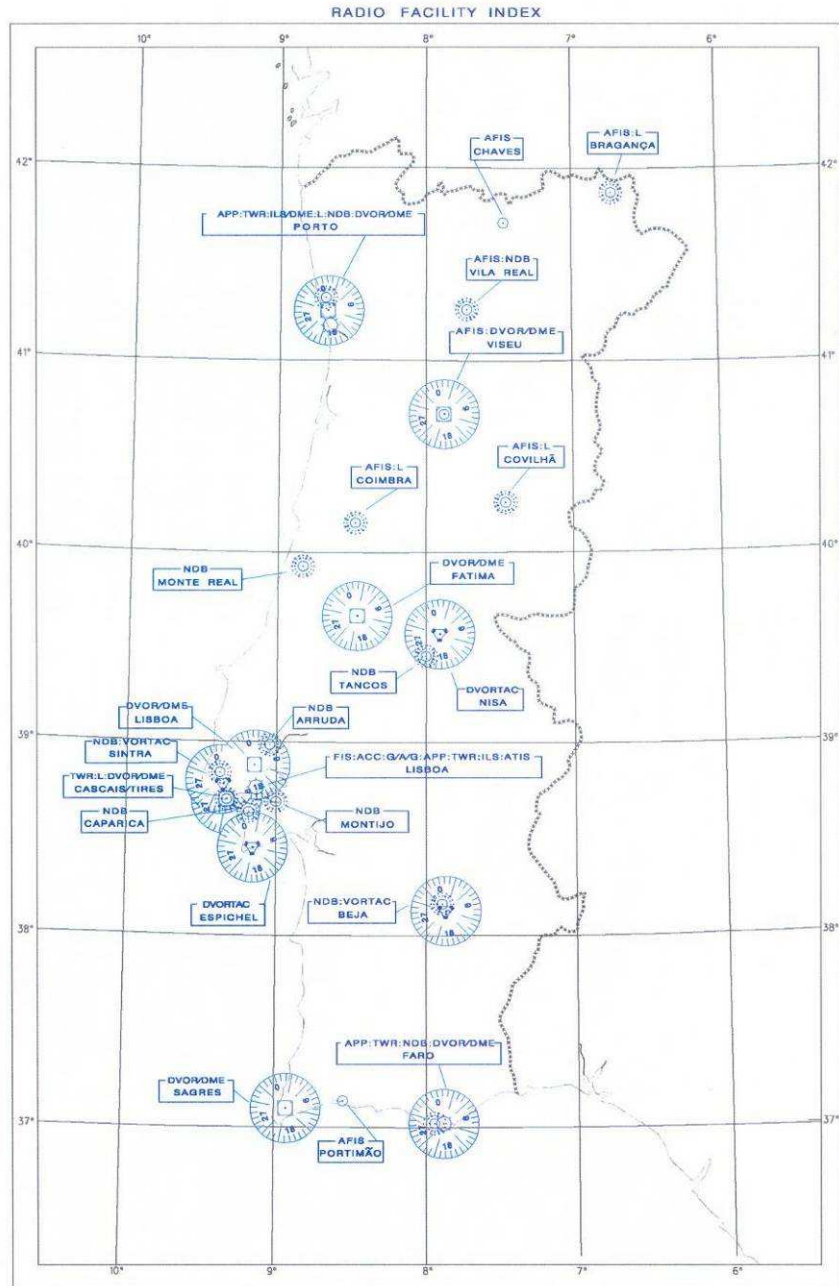
## **6.2 Rede viária e aeroportuária em 2008 e perspectivas futuras**

Nos últimos 20 anos, assistiu-se a uma profunda alteração das redes de infra-estruturas e de equipamentos em Portugal, processo que foi acelerado com a transferência de fundos comunitários para o País. A aprovação dos Planos Rodoviários Nacionais de 1985 (PRN 1985) e de 2000 (PRN 2000) reflectiu as preocupações de construir um conjunto de vias que unissem as principais cidades do País e ligassem o litoral com o interior e o norte com o sul, assegurando ainda boas ligações às principais fronteiras terrestres. Da mesma forma, o desenvolvimento da rede rodoviária insular tem suportado a estruturação do território nas Regiões Autónomas, no sentido de uma aproximação dos principais aglomerados de cada ilha (PNPOT, 2006). A densidade da malha definida no PRN é bastante elevada, assegurando uma cobertura adequada de todo o território do continente.

A Rede Nacional de Auto-estradas (RNA) apresentada na Fig. 26, foi definida no Plano Rodoviário Nacional (PRN) 2000, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 222/98, de 17 de Julho, com a alteração constante na Lei n.º 98/99, de 26 de Julho. A RNA integra os lanços dos Itinerários Principais (IP) e Complementares (IC).

As Fig. 27 a Fig. 29 apresentam os mapas dos actuais aeroportos nacionais e internacionais do País, a que se juntará o novo aeroporto de Lisboa cuja execução se prevê ter início a breve prazo.





NAV Portugal, E.P.E.

Fig. 27 - Mapa dos aeroportos nacionais e internacionais de Portugal Continental (enviada pelo Centro de Documentação e Informação do Instituto Nacional de Aviação Civil)

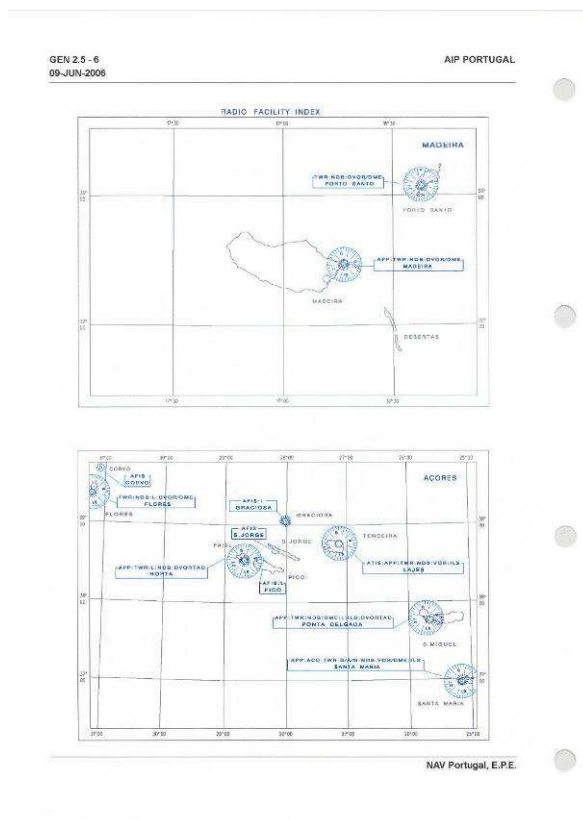


Fig. 28 - Mapa dos aeroportos nacionais e internacionais de Portugal Insular (enviada pelo Centro de Documentação e Informação do Instituto Nacional de Aviação Civil)



Fig. 29 - Aeroportos internacionais de Portugal (<http://www.icep.pt/portugal/portugal.asp>)

## 6.3 Contaminação e seus potenciais efeitos na qualidade das águas subterrâneas

### 6.3.1 Tipo de contaminantes rodoviários e sua origem

Os possíveis impactes de um projecto rodoviário na contaminação dos recursos hídricos receptores podem advir da fase de construção, de operação e de manutenção da estrada. O tipo e intensidade de contaminação dependem de um conjunto de características e de circunstâncias do próprio local. O Quadro 13 apresenta uma breve indicação do tipo de contaminantes expectável para as diferentes fases do projecto de uma estrada.

Quadro 13 - Indicação dos potenciais contaminantes de estradas em diferentes fases (DMRB, 2006)

Tipo de contaminante	Construção	Operação	Manutenção
Sedimento	A	B	A
Metais		A	A
Hidrocarbonetos	C	A	B
Componentes do degelo		A	

*Legenda: A – potencial maior; B – algum potencial; C – potencial menor*

Os principais impactes resultantes da fase de construção devem-se ao possível aumento sólidos em suspensão nas águas a jusante causado pela mobilização de terras e o aumento da erosão dos solos. Nesta fase há também registo de acidentes resultantes de fugas de óleos da maquinaria utilizada e de combustíveis que podem causar o aumento de hidrocarbonetos nas águas de jusante, caso não haja as necessárias medidas de prevenção e de mitigação. Esta fase tem sido a menos estudada dada o seu efeito muito localizado no tempo.

A fase de operação da estrada, com a criação de águas de escorrência, tem sido objecto de diversos estudos desenvolvidos nas últimas décadas na Europa e nos EUA.

As estradas são projectadas de forma a drenar livremente, por gravidade, a água, prevenindo assim a sua acumulação nas faixas de rodagem. Desse modo, os contaminantes depositados à superfície da estrada são rapidamente lavados após períodos de precipitação.

A génese dos contaminantes rodoviários deve-se a cinco conjuntos de factores principais: tráfego e carga, pavimento, equipamento da estrada, manutenção e origens exteriores.

Entre os contaminantes mais comuns associados à contaminação rodoviária encontram-se os metais pesados (zinco, cobre, chumbo, cádmio, crómio, ferro, níquel, cobalto e vanádio), os hidrocarbonetos (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, os óleos e gorduras), partículas em



suspensão (vidro, plástico, poeira), matéria orgânica (poeira, húmus) e nutrientes (azoto, fósforo, sais), cujas principais origens vêm descritas no Quadro 14.

Quadro 14 - Principais contaminantes presentes no ambiente rodoviário e suas origens

Tipo de poluente	Principais origens																
	Tráfego e carga					Pavimento			Equipa- mento	Manutenção			Origens exteriores				
	Material da viatura	Pneus	Travões	Combustível e/ou óleo do motor	Óleos de lubrificação	Carga	Pedra	Betume	Material secundários e alternativos	Guardas de segurança e sinalização	Inverno/Verão	Pinturas	Controlo da vegetação	Limpeza de neve	Lixos	Excrementos	Contaminação atmosférica
Metais pesados	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X		X	X		X
Cádmio		x	x									x					
Chumbo		x	x	x													
Cobre	x	x	x									x					
Crómio	x	x	x														
Ferro	x	x															
Níquel		x										x					
Vanádio				x	x												
Zinco	x	x	x	x						x		x					
Hidrocarbonetos	X	X		X	X	X		X	X			X	X				X
Nutrientes				X		X			X		X		X	X	X	X	X
Detergentes	X			X						X	X						
Matéria				X		X		X	X		X		X	X	X	X	X
Partículas	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X			X	X	X	X
Microrganismos						X								X	X	X	X

Fonte: adaptado de James (1999); Sansalone e Buchberger (1997); Leitão et al. (2000a e b, 2005a); e Folkesson et al. (2008)

A intensidade de emissão destes contaminantes e a qualidade das águas de escorrência associada depende de vários aspectos ligados às características do próprio tráfego - tais como o volume de tráfego, a proporção de veículos ligeiros e pesados, velocidade e modo de condução - ao próprio perfil longitudinal e transversal da estrada, aos materiais dos pavimentos, às operações de manutenção e aos tipos de combustível utilizados, entre outros aspectos.

O volume de tráfego, a velocidade, as acelerações, as ultrapassagens e travagens, bem como o tipo, o peso e a idade dos veículos produzem diferentes emissões de contaminantes que aumentam porquanto o motor necessita de mais energia e há mais desgaste dos componentes do veículo (James, 1999; Hird et al., 2000, Leitão et al., 2005a). DMRB (2006) referem 30 000 veículos de tráfego médio diário (TMD) como o número a partir do qual há impactes ao nível da contaminação, embora refiram que possa haver estradas com metade desse valor que apresentem problemas quando se trata de áreas sensíveis.

A idade, o tipo de material, a qualidade do pavimento e a sua resistência ao desgaste são os factores responsáveis pela maior ou menor libertação de partículas e contaminantes referidos no Quadro 14 para os pavimentos. Actualmente a reutilização de materiais alternativos usados, como agregados para a construção de estradas, pode ser responsável pela introdução de metais pesados, hidrocarbonetos e matéria orgânica. No projecto Europeu ALT-MAT "Alternative materials in road construction", referido com mais pormenor na Secção 6.5.1, este assunto é estudado para diversos materiais. De entre os materiais mais utilizados encontra-se: o asfalto, o cimento e o tijolo de demolições; rochas e solos associados com actividades mineiras; produtos secundários de processos metalúrgicos; e outros produtos secundários de indústrias, como as cinzas de incineração de resíduos sólidos urbanos (Folkeson *et al.*, 2008).

O equipamento das estradas inclui guardas de segurança, sinalização vertical e candeeiros compostos em parte por aço galvanizado cuja corrosão pode vir a libertar metais como o zinco (Barbosa e Hvitved-Jacobsen, 1999). A corrosão destes equipamentos é promovida pela precipitação, *splash* dos carros e aplicação de sais de degelo que podem solubilizar o zinco.

As operações de manutenção de uma estrada podem ser diversas e ter efeitos negativos na qualidade das águas de escorrência. O efeito da adição de sal para o degelo das estradas é um dos factores reconhecidos como fonte de contaminação por sais (NaCl) de águas subterrâneas e superficiais (Blomqvist, 1998) e pela consequente mobilização de metais pesados acumulados nos solos adjacentes (Norrström e Jacks, 1998). A remoção de pintura envelhecida, antes de novas pinturas do equipamento também liberta metais e partículas para o ambiente. Finalmente, o controlo da vegetação com uso de químicos é em muitos casos uma origem de contaminação.

Finalmente, encontram-se entre as origens externas de contaminação de estradas contaminantes que surgem no pavimento, mas cuja origem é externa, como o caso de lixo rejeitado pelos passageiros ou por animais, animais mortos e várias outras fontes de contaminação agrícola, industrial que chegam à estrada pela atmosfera.

Os impactes causados por este tipo de contaminação podem traduzir-se tanto em ocorrências habituais contínuas - cargas contaminantes acumuladas no pavimento, devido à passagem do tráfego e comportamento dos utentes - como ocorrências pontuais ou extraordinárias, como são o caso de actividades de manutenção/reparação da via e taludes, ou derrames acidentais, geralmente na sequência de acidentes envolvendo o transporte de substâncias tóxicas ou perigosas (Leitão *et al.*, 2002). A acumulação de contaminantes causa um *stress* contínuo na vegetação, animais e microflora ao longo das estradas, raramente causando efeitos agudos tóxicos. Pelo contrário, a contaminação resultante de acidentes, muitas vezes envolvendo transporte de grande quantidade de combustíveis ou de substâncias químicas, pode causar efeitos agudos tóxicos.

O principal veículo de transporte da contaminação acima referida é a própria água de escorrência da estrada e, com menor expressão, a deposição em áreas adjacentes por *splash* e deposição de poeiras resultantes do movimento dos veículos, a dispersão atmosférica e a infiltração através da própria estrada, esta última analisada por Dawson *et al.* (2008).

A carga poluente nas águas de escorrência é uma função do tipo de secção da estrada, TMD (tráfego médio diário), da velocidade média, do tipo de pavimento, das operações de manutenção, do uso do solo da zona envolvente, do período seco antecedente, da qualidade do ar, dos ventos dominantes, da intensidade e duração da precipitação, do uso do solo na envolvente. No entanto, embora se saiba quais as variáveis que interferem com a emissão de contaminantes rodoviários e a sua acumulação e dispersão ou transporte no ambiente, é difícil estabelecer relações entre todas as variáveis.

Barbosa (2003) apresenta um conjunto de modelos de previsão da qualidade das águas de escorrência das estradas para Portugal. A mesma autora desenvolveu posteriormente esta temática (Leitão *et al.*, 2005) onde refere vários processos e modelos de previsão designadamente os de FHWA (1996), Waniellista e Yousef (1993) e Burton e Pitt (2002, in James, 1999). Leitão *et al.* (2005) apresenta um quadro síntese de valores ilustrativos da qualidade das águas de escorrência obtidos em cerca de duas dezenas de estudos, recentemente actualizado em Folkesson *et al.* (2008).

Quadro 15 - Valores exemplificativos da qualidade das águas de escorrência obtidas em diversos estudos (Folkeson *et al.*, 2008)

País, local, publicação	TMD	pH		Condutividade eléctrica (µS/cm)		SST (mg/l)		Pb (µg/l)		Zn (µg/l)		Cu (µg/l)		Cd (µg/l)		Cr (µg/l)	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
USA, Bellevue WA [Ebbert <i>et al.</i> 1983] a)		3,4	7,9	12	1 480	1	2740	4	1 800	-	-	-	-	-	-	-	-
USA, Ohio [Pitt 1985] b)		5,2	7,4	16	300	24	620	<100	820	30	370	-	-	-	-	-	-
Norway [Lygren <i>et al.</i> 1984] b)	8 000	6,7	9,1	41	5 870	162	2420	62	690	91	740	10	430	-	-	-	-
Germany [Stotz 1987] b)	41 000	-	-	-	-	-	137	-	202	-	360	-	97	-	-	-	-
	47 000	-	-	-	-	-	181	-	245	-	620	-	117	-	-	-	-
	40 600	-	-	-	-	-	252	-	163	-	320	-	58	-	-	-	-
UK [Revitt <i>et al.</i> 1987] b)	37 600	-	-	-	-	2	192	-	181	-	-	-	63	-	-	-	-
UK [Hamilton <i>et al.</i> 1987] b)	720	-	-	-	-	-	-	-	28,1	-	16,6	-	6,5	-	-	-	-
Germany [Dannecker <i>et al.</i> 1990] b)	500	-	-	-	-	-	-	-	122	-	166	-	75,9	-	-	-	-
USA [Hvitved-Jacobsen & Yousef 1991] b)	-	5,9	7,8	45	175	-	-	30	379	13	173	10	101	-	-	-	-
UK [Hewitt & Rashed 1992] b)	150	-	-	-	-	-	-	1	151	0,7	65	0	14	-	-	-	-
France [Bardin <i>et al.</i> 1996] b)	-	-	-	-	-	37	128	<5	90	177	681	9	49	-	-	-	-
USA [Thomson <i>et al.</i> 1997]	-	-	-	-	-	-	116	-	-	-	169	-	-	-	-	-	-
USA, Texas [Barrett <i>et al.</i> 1998]	8 780	-	-	-	-	-	91	-	15	-	44	-	7	-	-	-	-
	47 200	-	-	-	-	-	19	-	3	-	24	-	12	-	-	-	-
	58 200	-	-	-	-	-	129	-	53	-	222	-	37	-	-	-	-
Portugal, Vila Real [Barbosa 1999]	6 000	5,9	7,2	8,8	184	<8	147	<1	200	<50	1 460	<1	54	-	-	-	-
UK [Hares & Ward 1999]	140 000	-	-	-	-	-	-	-	81	-	208	-	274	-	14,1	-	105
	120 000	-	-	-	-	-	-	-	70	-	188	-	248	-	11,9	-	86

UK [Moy <i>et al.</i> 2002]	71 900	-	-	-	-	-	88,6	-	-	-	8,6	-	-	-	-	-	-
	23 600	-	-	-	-	-	318	-	51,4	-	163	-	33,6	-	0,99	-	11,5
	36 100	-	-	-	-	-	101	-	50,4	-	66,8	-	23,3	-	0,56	-	9,08
	83 600	-	-	-	-	-	82,7	-	16,7	-	29,0	-	11,8	-	0,25	-	7,73
	65 000	-	-	-	-	-	45,8	-	15,4	-	55,7	-	17,6	-	0,43	-	4,82
	37 200	-	-	-	-	-	51,4	-	4,38	-	21,4	-	16,5	-	0,21	-	2,72
	All	-	-	-	-	15,2	1350	0,00	178	0,00	536	0,00	90,0	0,00	5,40	0,00	49,0
USA [Kayhanian <i>et al.</i> 2003]	<30 000	-	7,0	-	-	-	168	-	1,2	-	35,3	-	6,5	-	-	-	1,7
	>30 000	-	7,4	-	-	-	145	-	6,1	-	79,1	-	14,7	-	0,3	-	2,6
	All	5,1	10,1	-	-	1	5100	0,2	414	3	1 020	1	121	0,02	6,1	0,6	22
UK, Reading c)	98 200	6,0	7,7	150	12 000	160	704	43	1 800	140	4 200	50	1 000	<1	13		<20
UK, Oxford c)	77 700	6,5	6,7	72	2 000	70	134	<20	54	84	200	22	55	<1			<20
Netherlands, Nieuwegein# c)	150 000	6,5	7,6	120	9 600	-	-	3	95	52	1 700	17	160	0	2	0	5
Netherlands, Spaarnwoude# c)	90 000	5,7	7,8	90	3 500	-	-	0	88	28	290	13	61	0	3	0	20
Sweden, Svaneberg c)	7 350	6,3	7,1	30	10 000	-	-	3	18	51	220	6	70	0	0	0	2
Sweden, Norsholm c)	18 000	6,2	7,7	50	33 000	-	-	4	43	92	490	12	100	0	1	2	11
Finland, Lohja c)	13 700	6,8	7,6	59	5 100	<10	50	6	15	54	88	0	17	0,08	0,2	0	3
Finland, Utti c)	8 000	6,9	7,1	57	2 400	<10	10	5	10	57	92	0	16	0,05	<0,3		<10
Denmark, Vejenbrod c)	29 000	6,8	7,9	42	14 000	<10	40	8	46	47	330	3	95	<0,1	1	4	66
Denmark, Rud c)	22 000	6,6	7,3	31	20 000	13	607	5	47	100	700	18	140	0,07	1	1	9
France, Erdre# c)	24 000	6,7	7,8	41	5 300	6	507	5	41	130	460	<2	32	<0,10	2	<0,5	2
France, Houdan# c)	21 000	7,0	7,9	91	1 300	0	114	10	76	<10	300	8	48	0,10	1	1	6
Portugal, Recta do Cabo c)	21 800	7,5	8,3	120	1 400	18	1560		<100	<100	170	2	130		<10		<100
Portugal, Vila Real c)	8 500	6,6	7,5	<50	<110	<3	316		<100	1 100	2 000	1	<100		<10		<100

TMD = Tráfego médio diário (veículos/dia); # asfalto poroso.

a) Matos *et al.* [1999]. b) Barbosa [1999]. c) Folkesson [2000] e TRL [2002].

### 6.3.2 Tipo de contaminantes aeroportuários e sua origem

As questões relacionadas com a contaminação dos solos e das águas das áreas envolventes a aeroportos é uma matéria apenas recentemente estudada, pelo que a informação existente é ainda escassa e reporta-se essencialmente às duas últimas décadas. Em Portugal, à data, desconhece-se qualquer estudo no domínio da monitorização de águas e de solos nas áreas envolventes a aeroportos.

As interações entre uma infra-estrutura aeroportuária e a água são múltiplas e complexas. Os seus efeitos fazem-se sentir tanto na fase de construção como na de exploração da infra-estrutura.

As modificações impostas por uma infra-estrutura desta natureza começam desde logo no próprio processo físico de construção da plataforma e das restantes infra-estruturas, podendo ser induzidos impactes negativos ao nível:

- da modificação da estrutura dos próprios meios aquáticos, quando há necessidade de proceder a alterações em cursos de água ou a rebaixamentos do nível de aquíferos freáticos;
- da impermeabilização de uma vasta área, o que conduz à diminuição da capacidade de infiltração (e, assim, da recarga) e à produção de elevados volumes de águas de escorrência que é necessário escoar;
- da criação de resíduos sólidos e de efluentes.

Na fase de construção, são os trabalhos de escavação os que geralmente induzem as maiores alterações em termos de produção de contaminantes, na medida em que podem aumentar a erosão do solo e, assim, transportar matéria em suspensão para os cursos de água mais próximos, além de poder facilitar a entrada de contaminantes para o subsolo e para as águas subterrâneas. Assim, e no contexto de privilegiar a prevenção em detrimento do controlo e/ou da reabilitação, importa, desde a fase de construção à de exploração, usar materiais, processos e práticas que reduzam ou eliminem a geração e a emissão de contaminantes na fonte.

Alguns dos impactes acima referidos prolongam-se para a fase de exploração. Acrescem, nessa fase, os impactes causados pelas novas necessidades de água, quer para consumo dos passageiros quer para as restantes actividades do aeroporto, e pelos novos volumes de água residual e industrial, bem como de águas de escorrência pluvial que são produzidas e que necessário rejeitar. Bernadac *et al.* (2004) estimam um consumo de água entre 20 e 50 l por passageiro, dependendo da dimensão e do tipo de actividades do aeroporto.

As águas residuais e industriais são geralmente tratadas em sistemas clássicos de tratamento

de águas, pelo que não são objecto da presente análise. A contaminação aqui tratada cinge-se à análise das águas de escorrência geradas pela superfície impermeabilizada da plataforma aeroportuária.

Estudos conduzidos por Le Dean *et al.* (1995) sobre as águas de escorrência geradas numa plataforma aeroportuária põem em evidência que a origem deste tipo de contaminação se deve a: (1) contaminação atmosférica que é responsável por cerca de 15 a 25% dos contaminantes encontrados nas águas de escorrência e (2) acção da precipitação e lavagem das superfícies pavimentadas que passa, primeiro, por uma fase de dissolução dos elementos solúveis depositados à superfície após episódios de precipitação e, depois, pelo arraste e transporte dessas partículas quando o volume de água é suficiente para causar escoamento.

A contaminação originada pelas águas de escorrência pode ser distinguida consoante a sua origem e duração como (Gardim, 1998 e Legret *et al.*, 1999): (1) crónica, resultante do normal funcionamento da infra-estrutura; (2) sazonal, associada ao período de Inverno em que são aplicados produtos de degelo e (3) accidental, resultante de um incidente.

A contaminação sazonal é pouco relevante para a maioria das situações em Portugal e a accidental não será aqui directamente tratada na medida em que a sua perigosidade para o ambiente depende do tipo de produtos e da quantidade libertada, dependendo, por isso, de cada caso específico. Os principais tipos de contaminação accidental relacionam-se com derrames nos depósitos de armazenamento de combustíveis e com fugas em canalizações de águas residuais e nas canalizações de distribuição de combustíveis.

A contaminação crónica, resultante do normal funcionamento da infra-estrutura, está directamente associada à fase de exploração da obra. O seu valor é baixo mas acumulativo, isto é, não apresenta valores individualmente elevados mas, com a continuidade temporal, pode gerar impactes com algum significado. O conjunto de actividades que pode causar impacte na qualidade da água de escorrência e na qualidade das águas da zona envolvente, estão relacionadas com:

- ◆ funcionamento das aeronaves (com libertação de gases, de combustível, de óleos e de borracha dos pneus);
- ◆ limpeza, manutenção, reparação e abastecimento de veículos e de aeronaves (com libertação de combustível, de óleos, de solventes e de detergentes);
- ◆ actividades de construção e de reparação da zona aeroportuária (com produção de resíduos diversos);
- ◆ manutenção da área (*e.g.* uso de pesticidas e de agentes de degelo e anti-congelamento);
- ◆ fugas accidentais de combustíveis ou de químicos, de aeronaves ou de exercícios de incêndios (com produção de óleos e de mousses sintéticas).

Delrieu e Mars (2007) referem, de uma forma não exaustiva, o conjunto de áreas em terra susceptíveis de serem afectadas pela contaminação através das actividades acima mencionadas:

- ◆ área de depósitos de combustíveis;
- ◆ área de reabastecimento dos aviões;
- ◆ área de entrega de produtos aos veículos de apoio em terra;
- ◆ área de apoio a incêndios;
- ◆ áreas de manutenção e de reparação de veículos e de aeronaves;
- ◆ locais de armazenamento de resíduos sólidos;
- ◆ áreas de armazenamento de produtos perigosos.

Em relação às águas de escorrência da plataforma, apesar de todas as medidas para as recolher e tratar, poderá haver fugas resultantes de incidentes ou de volumes excessivos de águas. Por esse motivo, deverá haver sistemas de emergência no sistema de drenagem com: uma primeira linha de defesa com tanques separadores de óleos; uma segunda linha que integra a possibilidade de incorporar uma porta que bloqueia a passagem de água nos drenos, no término da área aeroportuária.

Além da origem de contaminação de solos e de águas subterrâneas acima referida, a própria deposição seca difusa de gases, bem como a eventual existência de fissuras em pavimentos julgados impermeáveis pode estar na origem de processos de contaminação.

O conjunto de actividades crónicas referido está na origem da deposição de diversos contaminantes que podem ser arrastados para os meios aquáticos. Apresenta-se uma síntese dos principais contaminantes gerados. O Quadro 16 apresenta uma súmula dos contaminantes gerados em operações efectuadas em áreas de estacionamento e de manutenção.

Quadro 16 - Contaminantes gerados em operações efectuadas em áreas de estacionamento e de manutenção (Le Dean *et al.*, 1995)

	Localização	Detergentes	Solventes	Sólidos	Óleos e gorduras	Hidrocarbonetos	Metais pesados	Fenóis
<b>Manutenção</b>								
Limpeza	Área de estacionamento e de manutenção	+++	+++	+	++	+	+	+
Reparação	Área de manutenção	-	++	-	+	-	++	+
<b>Re-abastecimento</b>	Área de estacionamento	-	-	-	+++	+++	+	++

Legenda: - = vestígios; + = muito pouco; ++ = pouco; +++ = muito

Os **hidrocarbonetos** constituem a origem principal de contaminantes de um aeroporto e resultam da combustão incompleta de combustíveis fósseis (Delrieu e Mars, 2007). Entre eles



encontram-se os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) destacando-se o benzo(a)pireno, o benzo(ghi)pireleno, o pireno, o fluoranteno, o fenantreno, o fluoreno, acenafteno, o naftaleno, e o antraceno. Estes elementos são gerados pela combustão incompleta do motor. A sua concentração nos carburantes empregues na aviação são da ordem de 30 a 100 mg/kg (Le Dean *et al.*, 1995). São produtos muito pouco solúveis e que se encontram adsorvidos às partículas de material sólido, designadamente em suspensão na água.

Os alcanos, componentes do JetA1 e do 100LL, são insolúveis na água mas são miscíveis na maioria dos líquidos orgânicos e são mesmo solventes para vários compostos orgânicos. Os BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) são outros compostos orgânicos aromáticos também presentes nos combustíveis, bem como o nafteno e o fenol. Estes constituem os hidrocarbonetos mais solúveis, mais móveis e mais tóxicos.

Além destes compostos hidrocarbonetos regista-se ainda a presença de resíduos de diesel de todos os veículos auxiliares de assistência em terra como as escadas para descida dos aviões, os limpa casas de banho, camiões bombeiro, veículos de reboque dos aviões, entre outros.

As áreas particularmente afectadas são as zonas de armazenamento e de depósitos de combustível, bem como as áreas de transporte e de distribuição do mesmo. A título de exemplo refere-se que a capacidade de um depósito de combustível de um Boing 747 é de 135 000 l e o abastecimento é feito por camiões cisterna ao ritmo de 8 000 l/min. Este facto evidencia os efeitos que um acidente no abastecimento pode ter. Le Dean *et al.* (1995) apresentam o número de pequenos (< 95 l) e grande derrames (> 95 l) de combustível no aeroporto de Whidbey Island, do estado de Washington, para o ano de 1990, como 83 e 462, respectivamente, num total de mais de 33 000 l derramados. A capacidade de remoção destes derrames depende da forma como se processa e dos meios disponíveis para a sua contenção, mas há sempre uma importante componente que é conduzida para posterior tratamento.

Os **detergentes** e os **solventes** constituem os principais elementos contaminantes resultantes da lavagem das aeronaves, juntamente com alguns óleos (Le Dean *et al.*, 1995). Os detergentes constituem uma grande variedade de produtos sintéticos. Embora os detergentes utilizados sejam crescentemente do tipo biodegradável, é necessário que as condições sejam aeróbias, o que nem sempre acontece nos esgotos.

Os solventes são utilizados para a lavagem e extracção de vários depósitos nas diferentes componentes do motor, como metais oxidados e gorduras. Segundo Le Dean *et al.* (1995) são sobretudo compostos como o cloreto de metileno, 1,2-dicloroetano e tricloroetileno. Estes compostos são bastante voláteis, pouco biodegradáveis e pouco absorvíveis à matéria em suspensão na água.

Os **metais pesados** são outra das origens de contaminação ligada ao transporte aéreo.

Destaca-se o cádmio, o zinco, o cobre, o níquel, a platina e o chumbo, os dois últimos essencialmente provenientes de carburantes e de óleos e os quatro primeiros da composição de pinturas e de produtos decapantes (Le Dean *et al.*, 1995). As máquinas e os veículos susceptíveis de emitir estes elementos metálicos são as escadas automotoras, elevadores, tractores de transporte de bagagens, tractores dos aviões, camiões cisterna, veículos de limpeza e de transporte de *catering*.

A origem destes contaminantes é semelhante à referida no Quadro 14. Delrieu e Mars (2007) apresentam a seguinte súmula destas origens para o caso específico de aeroportos:

- ◆ O chumbo é, essencialmente, utilizado nos lubrificantes e nos travões, desde que foi banido da gasolina no final do século passado. A acumulação de baterias de chumbo rejeitadas também pode ser uma fonte de Pb no ambiente aeroportuário.
- ◆ O cádmio é utilizado como aditivo dos lubrificantes e como estabilizante das borrachas sendo, desse modo, emitido pelos pneus. O desgaste dos travões dos veículos é outra fonte de Cd, bem como a acumulação de pilhas de cádmio.
- ◆ O zinco é empregue como aditivo de lubrificantes, nas vedações, e nas vias laterais de segurança. É, também, um elemento emitido pelo desgaste dos pneus e pelos travões dos veículos, podendo ser ainda encontrados vestígios deste elemento em pesticidas.
- ◆ O cobre, o crómio e o manganés são metais que podem ter origem no desgaste dos travões dos veículos e nas borrachas dos pneus (crómio e níquel). O cobre pode também ser encontrado em pesticidas.
- ◆ O bário, cobalto, crómio e molibdénio são metais que existem nos lubrificantes e que podem ser libertados para o ambiente.

O Quadro 17 apresenta os resultados dos valores médios de concentração de águas de escorrência obtidas para três aeroportos de França onde foram realizadas cerca de 20 campanhas de amostragem (cf. Secção 6.5.2).

Quadro 17 - Valores médios de concentração das águas de escorrência de aeroportos, obtidos em amostragem de aeroportos de França (Legret *et al.*, 1999)

	pH	SST (mg/l)	CQO (mg/l)	N (mg/l)	HC (mg/l)	Pb (µg/l)	Cu (µg/l)	Cd (µg/l)	Zn (µg/l)
Nantes-Atlantique	7,1	18	42	1,9	0,08	10	33	1,9	87
Marseille-Provence	7,4	82	74	2,3	1,6	23	14	4,5	210
Lyon-Satolas	7,1	15,6	70	1,4	0,67	11	16	4,0	85

Além das origens acima referidas, nos países onde são aplicados produtos anti-congelantes e de degelo apresentam ainda libertação de contaminantes como ureia ( $H_2NCOH_2N$ ), acetatos

(de potássio, de cálcio, de magnésio e de sódio), glicol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>), etilenoglicol, propilenoglicol e outros químicos líquidos. Estes compostos apresentam um ponto de congelamento em torno de - 10°C. Betts (1999) estima que no estado de Washington um aeroporto de dimensão média gaste uma média de 70 000 litros por ano de produtos de degelo e Legret *et al.* (1999) estimam que a necessidade de solução por avião é de cerca de 750 l. À medida que o glicol e seus derivados se decompõem, aumenta a carência bioquímica de oxigénio, com consequências para o suporte da vida aquática. Os sais (NaCl), usualmente utilizados para o degelo nas estradas, não têm uma aplicação significativa nos aeroportos devido ao seu carácter corrosivo (Legret *et al.*, 1999).

Há, ainda, a referir a ocorrência de produtos anti-incêndio que são geralmente utilizados para neutralizar incêndios com hidrocarbonetos, bem como para arrefecimento de materiais. De acordo com Delrieu e Mars (2007), este tipo de material inclui emulsionadores proteicos e sintéticos e fluoretos sintéticos. Dada a extensão de aplicação destas substâncias quando são necessárias, este pode ser um tipo de contribuição importante na degradação dos solos e águas nas áreas envolventes caso não seja efectuada de forma apropriada a sua remoção.

Para além do já referido, há todo um conjunto de potenciais contaminantes que provêm das inúmeras operações de manutenção entre os quais se encontram os óleos, solventes, antigripantes, líquidos de arrefecimento, anti-corrosão, lubrificantes, pinturas, etc.

Pelo acima exposto, pode verificar-se a importância dos procedimentos dos vários operadores numa área aeroportuária para a minimização de perdas das várias substâncias que nela circulam.

Assegurar a protecção do meio ambiente na área envolvente de uma zona aeroportuária deve ser um aspecto-chave de um programa de gestão ambiental cujo principal objectivo é minimizar e prevenir o risco de contaminação resultante das actividades aí desenvolvidas. No caso do descritor *Recursos Hídricos* é fundamental que a protecção das águas de superfície e subterrâneas envolventes permita assegurar que os ecossistemas a elas associados não são afectados. Esta relevância resulta não apenas de exigências de legislação (Lei da Água) mas também de requisitos de segurança e de imagem que projectos de grande envergadura devem assegurar também em relação à componente ambiental.

De acordo com os estudos realizados sobre as águas subterrâneas das áreas envolventes de aeroportos, as principais ocorrências responsáveis por processos de contaminação devem-se essencialmente a fugas nos depósitos de armazenamento de combustível e nas canalizações que transportam o combustível para as áreas de reabastecimento, em especial naquelas que se encontram enterradas e sem acesso directo.

A legislação americana impõe aos aeroportos com tráfego anual superior a 50 000 aviões uma monitorização da água pluvial rejeitada para os seguintes parâmetros (Le Dean *et al.*, 1995):

óleos e gorduras; CBO5; CQO, SST, pH, glicóis e ureia (em especial os utilizados como anti-congelantes e produtos de degelo). Um estudo da EPA identificou outros contaminantes a monitorizar onde se encontram os metais pesados (Cu, Pb e Zn); produtos químicos inorgânicos (Cn) e produtos derivados do petróleo.

### **6.3.3 Potenciais efeitos na qualidade das águas subterrâneas**

#### **6.3.3.1 Aplicação da metodologia DPSIR à contaminação de estradas**

A análise conceptual da relação entre a origem da contaminação de estradas e as consequências ambientais, nomeadamente para as águas subterrâneas pode ser sistematizada através da aplicação do modelo DPSIR, descrito na Secção 3.5.

A aplicação deste modelo conceptual ao caso concreto da contaminação das estradas pode ser efectuada de acordo com o apresentado na Fig. 30 (cf. Leitão *et al.*, 2004).

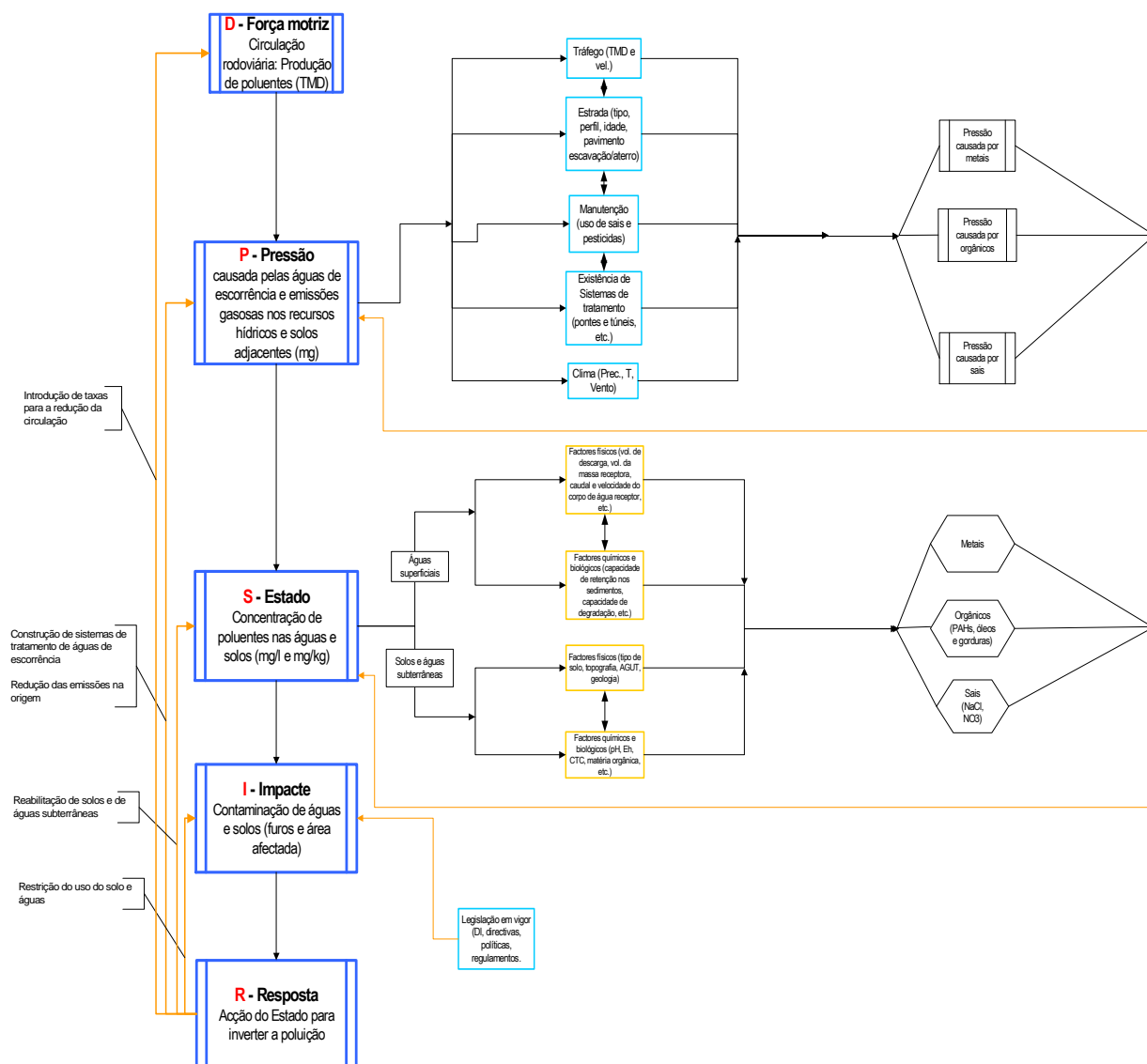


Fig. 30 - Aplicação do modelo conceptual DPSIR à contaminação causada por estradas (Leitão *et al.*, 2004)

Na Fig. 30 cada um dos indicadores é considerado da seguinte forma:

D - A força motriz representa o processo de circulação rodoviária. A necessidade de transporte de pessoas e de mercadorias impulsiona a construção de estradas com a consequente geração de contaminantes, factores que representam a força motriz do processo que conduz a uma pressão sobre o ambiente envolvente.

P - No âmbito da análise da contaminação por estradas, a Pressão é aquela que é causada pelas fontes de emissão de contaminantes, posteriormente transportadas pelas águas de escorrência e pelas emissões gasosas. Um indicador de Pressão poderá ser a carga poluente média anual de Zn das águas de escorrência de um determinado troço de estrada.

Como é referido no relatório, e esquematizado na Fig. 30, as variáveis que determinam a carga

poluente nas águas de escorrência de estradas, originando diferentes pressões são o TMD, a velocidade média, o tipo de secção da estrada, a proximidade a nós, o tipo de pavimento, as operações de manutenção, o uso do solo, o regime de precipitação, o período seco antecedente, a deposição seca, os hábitos culturais, entre outros aspectos. A existência de sistemas de tratamento de águas de escorrência ou de pontes e túneis deve ser equacionada na determinação da Pressão potencial.

A pressão causada é mensurável, por exemplo através dos valores de carga poluente média anual. Na Fig. 30 optou-se por apresentar essa pressão através dos 3 grupos principais de contaminantes provenientes da contaminação por estradas.

S - A pressão causada pela contaminação por estradas pode alterar o estado de alguns compartimentos do ambiente. Um indicador de Estado poderá ser a concentração de Zn nas águas subterrâneas da área envolvente de uma estrada. Neste trabalho, o meio receptor em análise são os recursos hídricos, incluindo também os solos, dada a sua interdependência com as águas subterrâneas.

Na Fig. 30 apresentam-se os principais factores que condicionam a migração dos contaminantes nos meios hídricos superficiais e subterrâneos. É o resultado da influência de todos esses factores que reflecte, para cada local, a susceptibilidade hídrica à contaminação por estradas e, assim, determinará o Estado de contaminação.

Chama-se a atenção para o facto de um dos aspectos a ter em consideração na definição de parâmetros do Estado é garantir uma monitorização adequada, *i.e.* que permita obter resultados representativos.

I – Os indicadores de Impacte reflectem a forma como o meio foi afectado. Este aspecto depende das políticas e legislação em vigor uma vez que o impacte é, também, função do uso do solo e dos recursos hídricos.

Possíveis indicadores de impacte poderão ser o número de furos poluídos com metais pesados na envolvente de uma estrada, ou o número de habitantes sem abastecimento de água devido ao encerramento de furos contaminados.

R - A Resposta pode ser aplicada sobre um ou mais dos estádios anteriores do modelo apresentado. Um exemplo de indicador de resposta (sobre a pressão) poderá ser o número de sistemas de tratamento construídos com o objectivo de diminuir a carga poluente da água de escorrência da estrada. Na Fig. 30 apresentam-se outros exemplos de Resposta sobre os diferentes indicadores apresentados.

Blomqvist (2001) apresenta um trabalho onde são aplicadas ferramentas semelhantes às descritas para o caso concreto das práticas de descongelamento em estradas e os seus efeitos

no ambiente. O objectivo desse trabalho foi propor um sistema de indicadores para melhorar os conhecimentos ambientais e, assim, as acções estratégicas a serem implementadas pelas autoridades competentes.

Os factores que condicionam a susceptibilidade à contaminação das águas subterrâneas por contaminantes resultantes do tráfego rodoviário, e assim o impacte que podem ter nos recursos hídricos e solos, podem-se englobar em dois grandes grupos: aqueles que se relacionam com o escoamento, condicionando a velocidade de escoamento e, conseqüentemente, o tempo que o poluente demora a ser transportado (factores físicos) e aqueles que se relacionam com os processos de mobilização/retenção do poluente (factores químicos e biológicos). Nas duas subsecções seguintes apresentam-se os principais processos a atender em cada uma destas variáveis.

### **6.3.3.2 Factores físicos que condicionam o transporte de contaminantes**

A influência dos factores físicos na migração dos contaminantes para o meio subterrâneo depende da facilidade de infiltração no meio subterrâneo e, depois, da forma como aí se processa a circulação da água.

Os factores físicos traduzem-se essencialmente na quantidade de água de recarga da zona saturada. As características físicas do material do solo e da zona vadosa abaixo do solo, como a textura, a porosidade e a condutividade hidráulica, condicionam a quantidade de água que se infiltra à superfície (infiltração superficial) e que mais tarde atinge a zona saturada, determinando o potencial regime de recarga e o tipo de escoamento subterrâneo e, assim, a capacidade de lixiviação dos contaminantes.

A ocupação do solo também pode condicionar a facilidade de ocorrência de infiltração e de escoamento subterrâneo. Uma ocupação do solo que torne o solo menos permeável faz baixar localmente a infiltração. O mesmo efeito tem uma ocupação do solo que retenha a água de precipitação na superfície do seu coberto. Por outro lado, se se tiver uma ocupação por um coberto vegetal com raízes mais profundas, maior é a reserva de água no solo utilizável pelas plantas para a evapotranspiração (AGUT) e, por conseguinte, mais água pode ser retirada do solo por essas plantas. Por este mecanismo haverá menos água de recarga, e a quantidade de poluente a chegar à zona saturada será menor. Contudo, esse poluente pode ser absorvido pelas plantas, juntamente com a água que a planta evapotranspira, e ficar retido na planta.

A topografia também desempenha aqui um papel de relevo. Nas zonas de topografia mais acidentada há condições mais favoráveis à ocorrência de escoamento superficial ao passo que em zonas mais planas há condições mais favoráveis para a ocorrência de infiltração.

Em qualquer das situações, uma diminuição da infiltração é favorável no sentido de uma diminuição local da susceptibilidade das águas subterrâneas à contaminação por estradas, mas

o aumento do escoamento superficial que tal situação implica, transfere os contaminantes e o risco de contaminação para outras áreas.

A enumeração dos factores físicos que se apresentou pressupõe a existência de um solo e de uma zona vadosa abaixo do solo onde o escoamento seja em meio de porosidade intergranular. No caso de existirem caminhos preferenciais bem desenvolvidos, ou de o meio geológico ser aflorante e muito permeável devido à ocorrência de fracturação intensa ou devido ao desenvolvimento de carsificação, então os processos referidos anteriormente deixam de ser determinantes e qualquer poluente tem o caminho facilitado para chegar à zona saturada com rapidez, desde que haja água de recarga.

A intensidade de contaminação, depende do volume da massa receptora e da concentração dos contaminantes.

### **6.3.3.3 Factores químicos que condicionam o transporte de contaminantes**

Entre os contaminantes mais comuns e preocupantes nas águas de escorrência encontram-se os metais pesados (zinco, cobre, chumbo, cádmio, crómio), os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), os óleos e gorduras e os sólidos suspensos totais, entre outros referidos na Secção 6.3.1. A matéria orgânica também pode revelar-se importante, ao estimular o crescimento de bactérias na massa de água.

Os metais pesados são elementos inorgânicos cuja forma iónica permanece solúvel na água. No solo, podem ser adsorvidos às partículas sólidas e à matéria orgânica, podendo formar complexos. Estes processos de especiação condicionam a mobilidade dos metais pesados no solo, de acordo com condições físico-químicas como o pH, o potencial redox e a temperatura. A adsorção retarda a dispersão dos metais pesados no ambiente, nomeadamente a sua migração até às águas subterrâneas. Contudo, se a quantidade de metais pesados atingir níveis de saturação, ou se ocorrem mudanças ambientais físico-químicas (por ex. do pH), a capacidade de adsorção do solo poderá modificar-se, podendo ocorrer uma solubilização de metais anteriormente associados a partículas e a sua consequente lixiviação para as águas subterrâneas.

Outros autores (James, 1999 e Leitão, 2000a) concluíram que o tempo de retenção dos metais pesados no solo, antes de alcançarem o nível freático, pode ser muito longo. Nestes estudos em que se apresentam vários cenários do processo de retenção dos metais pesados, concluiu-se que, a metais diferentes, correspondem tempos diferentes de retenção. Uma das razões apresentadas é a forte fixação do chumbo pela matéria orgânica (Hildebrand e Blum, 1975, *in* James, 1999), o que significa que há acumulação do chumbo na zona mais superficial do solo, onde o conteúdo de matéria orgânica é maior. A adsorção potencial do solo em metais pesados é a seguinte, por ordem decrescente: Hg>Pb>Cu>>Zn>Co>Ni>Cd (Brummer, 1986). Deste modo, quando se verifica a retenção de metais pesados nos solos significa que o problema



persiste há já algum tempo.

Os metais pesados, ao contrário dos contaminantes orgânicos, não são degradáveis no ambiente, por isso acumulam-se nos organismos vivos, tornando-se tóxicos a partir de determinadas concentrações, variáveis de acordo com o metal em causa. Através da cadeia alimentar podem começar por afectar as plantas, indo posteriormente causar impactes em diferentes níveis da cadeia trófica.

Os seus efeitos no organismo humano podem originar doenças crónicas e cancerígenas, sendo os metais mais tóxicos e perigosos, o mercúrio, o cádmio e o chumbo, com uma elevada tendência para se acumularem, em especial no fígado, causando disfunções em diversos órgãos. O chumbo também pode afectar o sistema nervoso central (Merain, 1991).

Le Dean *et al.* (1995) sintetizam estas diferenças para diversos metais pesados, referindo-se nos seguintes parágrafos os aspectos mais relevantes relativamente aos metais que resultam da contaminação por estradas ou, também, por aeroportos:

- ◆ o Cu metálico é muito pouco solúvel na água, contrariamente ao que acontece aos seus sais; pode ser retido no solo através de mecanismos de trocas e de adsorção, contudo possui uma grande afinidade para com os ligantes orgânicos solúveis e, neste caso, a formação destes complexos aumenta a sua mobilidade nos solos;
- ◆ o Zn tem tendência para ser adsorvido pelos minerais de argilas, carbonatos e óxidos de Fe e Mn, mas também pelos sólidos em suspensão na água, ficando neste caso em solução; devido à sua elevada solubilidade, a precipitação não é um mecanismo importante na sua retenção; a sua hidrólise ocorre quando o pH atinge o valor de 7,7 e estas espécies são fortemente adsorvidas ao solo;
- ◆ o Cd é um metal relativamente móvel mas que pode formar complexos com produtos orgânicos ou ser adsorvido pelos minerais de argila, carbonatos, óxidos de Fe e Mn, bem como precipitar como carbonato, hidróxido ou fosfato; quando o valor de pH é superior a 6, o Cd é adsorvido pelo solo ou precipita; pode formar complexos solúveis com os aniões Cl<sup>-</sup>;
- ◆ o Pb reage com os minerais de argila, os fosfatos, os sulfatos, os carbonatos, os hidróxidos e a matéria orgânica; quando o pH é superior a 6 pode ser adsorvido pelos minerais de argila ou ligar-se aos carbonatos; pode também formar complexos com os ligantes orgânicos, aumentando a sua mobilidade no solo;
- ◆ o Cr tem dois estados de oxidação nos solos: Cr(III) e Cr(VI), sendo este último mais tóxico; devido à natureza aniónica do Cr(VI) a sua adsorção pelo solo está limitada aos locais de troca com carga positiva, que diminuem com o aumento do pH; este é o único

metal móvel em solos alcalinos; a sua retenção está relacionada com os óxidos de Fe e Mn e com o pH; o Cr(III) é adsorvido pelo solo quando o valor de pH é superior a 5; a precipitação das espécies hidróxidos de Cr(III) ocorre quando o pH atinge 5,5;

- o Ni é um metal bastante móvel, embora ocorram processos de adsorção em presença de produtos orgânicos; a sua dinâmica, aliás como acontece para a maioria dos metais pesados está dependente do pH do meio, sendo a sua maior mobilidade encontrada para valores de pH baixo; sob a forma de metal é estável.

De acordo com Yong *et al.* (1992), os metais são geralmente solúveis em ambientes de pH muito elevado, mas existem outros substratos no solo que podem precipitar na presença de pH elevado, como por exemplo, o sulfito da forma do enxofre, que precipita em ambientes de pH muito elevado. Pode-se observar também que o sulfato exerce uma influência significativa no decréscimo da mobilidade dos metais pesados. O sulfato precipita um sal insolúvel com quase todos os metais pesados, na presença do potencial redox elevado. Se as condições redutoras diminuïrem, os sulfatos tenderão a diminuir também e o efeito da precipitação desaparecerá. As reacções redox são lentas e o sulfito, que é estável em condições redutoras, não tem tempo para se formar.

Outros aspectos que terão que ser analisados mais especificamente no contexto ambiental da envolvente das estradas são os fenómenos de adsorção selectiva e de competição entre metais pesados, dado que as águas de escorrência apresentam diferentes metais (essencialmente, Zn, Cu e Pb) em gamas de concentrações específicas.

Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) são compostos por 4 a 7 anéis de benzeno e são gerados pela combustão incompleta dos combustíveis fósseis pelos motores. Estes elementos são pouco solúveis. Os hidrocarbonetos além de não serem conservativos, são mais facilmente lixiviados do que os metais pesados. A luz solar, na presença de oxigénio, é um processo não biótico que provoca reacções químicas nas moléculas dos hidrocarbonetos, tornando-as mais perigosas do ponto de vista ambiental. Nestas condições, alguns compostos adquirem mais facilmente uma forma iónica, tornando-se, conseqüentemente, mais solúveis na água. Este tipo de processo deverá ser frequente em Portugal, onde existem muitos dias por ano com radiação solar.

Durante a infiltração, os hidrocarbonetos podem evaporar-se ou permanecer no solo (Clark, 1995, *in* James, 1999).

Ao contrário dos metais pesados, os hidrocarbonetos não são adsorvidos pelas partículas minerais, mas unicamente pelos substratos orgânicos. Conseqüentemente, os factores condicionantes da sua mobilidade são a matéria orgânica presente e os microrganismos (por ex.: bactérias). O transporte dos hidrocarbonetos depende do tipo de solo e da densidade dos compostos: os hidrocarbonetos de baixa densidade (LNAPL) ficam retidos nas zonas capilares

(Young *et al.*, 1992) e os densos (DNAPL) tendem a migrar para maiores profundidades do solo, até encontrarem uma camada impermeável.

A presença dos hidrocarbonetos no solo promove a redução de oxigénio disponível, como consequência de reacções químicas e da actividade microbiana. Por seu turno, a redução de oxigénio aumenta a quantidade de bactérias anaeróbias que utilizam o óleo como principal fonte de energia. As bactérias fomentam diferentes tipos de reacções redox que alteram a estabilidade química e física do solo, aumentando a solubilidade de alguns metais (por exemplo ferro) e a mobilidade dos metais pesados para as águas subterrâneas (James, 1999). Estes sistemas complexos estão intimamente ligados e podem dar origem a reacções imprevisíveis no que respeita à mobilização dos contaminantes.

No caso de aeroportos que utilizem produtos para evitar a formação de gelo, como o caso de compostos à base de glicol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>), considera-se que estes elementos possuem uma elevada biodegradabilidade em condições normais. Não obstante, a sua fuga para o meio ambiente pode causar uma importante diminuição da CBO das águas receptoras (Le Dean *et al.*, 1995).

Por outro lado, segundo Le Dean *et al.* (1995), a utilização de ureia (H<sub>2</sub>NCOH<sub>2</sub>N) como produto descongelante (uma vez que o seu ponto de congelamento é -10°C) tem como principal consequência, para o ambiente, a formação de amoníaco e de dióxido de carbono através da hidrólise da ureia:



Por seu lado, a presença de amoníaco tem como possível consequência a formação de outros compostos de azoto, como o nitrito e o nitrato. A presença de nutrientes nas águas de escorrência pode contribuir para o crescimento da vegetação e de algas. Se a taxa de crescimento de microrganismos e de algas for elevada (eutrofização), devido à presença de grandes quantidades de nutrientes, verifica-se uma significativa redução de oxigénio disponível na água e no solo, o que provoca a morte de algumas espécies de bactérias e de plantas promovendo a libertação de contaminantes e de toxinas.

Estas águas residuais, quando subsaturadas em oxigénio podem, ao atingir as águas superficiais, afectar directamente a fauna, em especial os peixes. Por exemplo, reporta-se um caso ocorrido nas West Midlands, onde as águas de escorrência de uma estrada poluíram o rio, causando a morte de muitos peixes, devido à carência de oxigénio (James, 1999).

Em síntese, os factores químicos que condicionam a mobilidade ou a retenção de contaminantes no solo, relacionam-se com a composição, quer da fase sólida quer da fase líquida do solo, e com as suas propriedades intrínsecas, nomeadamente, o pH e o potencial redox (Eh). No que refere à composição da fase sólida interessa determinar o tipo de argilas presente, o teor de matéria orgânica, a percentagem de carbonatos e de óxidos de Fe e Mn; na fase líquida é importante determinar a existência de elementos com os quais os contaminantes

poderão formar complexos solúveis ou que precipitem. Leitão *et al.* (2004 e 2005) apresentam de forma mais detalhada a importância das propriedades dos solos e das águas subterrâneas que afectam a mobilidade química dos contaminantes em meio subterrâneo.

## **6.4 Medidas de minimização e avaliação da sua eficácia**

### **6.4.1 Conceptualização**

#### **6.4.1.1 Introdução**

Os vários estudos realizados na Europa e nos Estados Unidos da América nas últimas décadas, e em Portugal desde a década de 90, permitiram concluir que a implantação de uma estrada ou infra-estrutura aeroportuária nunca têm um impacte nulo no ambiente onde se inserem, já que os materiais de que são construídas impõem uma resposta diferente em termos hidrológicos quando comparada com os solos que existiam no local. Por outro lado, a construção interrompe, também por isso, o regime natural precedente.

Por outro lado, os estudos realizados (*e.g.* para Portugal em Barbosa, 1999; Leitão *et al.*, 1999, 2000 e Diamantino, 2002) permitiram obter e analisar informação sobre emissões e processos de dispersão de contaminantes emitidos pela estrada e pelo seu funcionamento, tendo sido identificada a sua importância relativamente a outro tipo de poluições bem como os processos mais adequados à sua minimização.

Apesar do reconhecimento da existência de contaminação emitida pelas estradas, medida nas suas águas de escorrência, em muitos casos a influência dessa contaminação nos meios hídricos não pode ser inequivocamente atribuída àquela origem e há situações em que a presença de contaminantes não é evidenciada nos meios hídricos. De facto, na grande maioria das situações há várias outras fontes próximas da estrada que poderão estar na origem da contaminação encontrada.

Por outro lado, presença de contaminantes nos meios hídricos depende da distância a que se encontram da origem e da dinâmica de escoamento e de transporte desse meio. É sabido que os meios hídricos superficiais têm uma maior dinâmica que a maioria dos meios hídricos subterrâneos pelo que são mais vulneráveis mas, por outro lado, também é mais fácil a contaminação ser removida em fases posteriores.

Por outro lado, o meio receptor das águas de escorrência, solos e águas, tem uma capacidade natural de remoção de contaminantes (até eventualmente atingir um ponto de saturação) que é muito variável de meio para meio e que constitui uma primeira barreira à dispersão de contaminantes. Uma vez ultrapassada essa capacidade, os contaminantes são transportados em dissolução para os meios hídricos superficiais e subterrâneos mas todo este processo de transporte até ao ponto de monitorização geralmente não ocorre nos primeiros anos de

funcionamento de uma estrada, pelo que importa ter dados de monitorização por prolongados períodos de tempo.

#### 6.4.1.2 Metodologia de abordagem para a prevenção e a mitigação da contaminação

A implementação de medidas de prevenção e de mitigação da contaminação deve ter como base a análise do possível destino dos contaminantes no ambiente. Nesse contexto, antes de conceber e de planear medidas de protecção, deverá haver um modelo conceptual da possível migração de contaminantes num dado ambiente que permita avaliar o risco de contaminação das massas de água envolventes. Brenčič *et al.* (2008) propõem que esse risco seja avaliado com base no modelo: origem - percurso - destino receptor. Aqueles autores descrevem metodologias de minimização *ex-situ* e *in-situ*, bem como medidas de intervenção e de não-intervenção que aqui se adoptam enquanto co-autoria do referido trabalho.

A prevenção de todo o tipo de impactes negativos gerados pela construção e pela exploração de uma estrada nunca será possível nem sequer desejável, na medida em que os custos que tal implicaria não seriam compensados pelos benefícios alcançados. Não obstante, há um conjunto de acções que devem ser postas em prática no sentido de reduzir os impactes negativos de contaminação. Em primeiro lugar, essas acções devem incidir na redução da contaminação na origem de forma a reduzir o seu aparecimento no meio receptor de destino. Para o efeito, propõe-se um conjunto de metodologias de minimização a adoptar, conforme apresentado no Quadro 18.

Quadro 18 - Classificação de métodos de minimização da contaminação rodoviária (Brenčič *et al.*, 2008)

TIPO DE MINIMIZAÇÃO	MÉTODO DE MINIMIZAÇÃO	
	<i>Ex-situ</i>	<i>In situ</i>
<b>Minimização na origem</b>	Prevenir Evitar	Prevenir Reduzir
<b>Minimização no percurso</b>	Reorientar	Interceptar
<b>Minimização no destino</b>	Compensar	Reabilitar

A **minimização na origem** pode ser efectuada através de métodos destinados a prevenir, evitar e reduzir a contaminação. Os primeiros são geralmente aplicados para anular a emissão de contaminantes para o ambiente em áreas ambientalmente sensíveis, como o caso de áreas de habitats sensíveis decretados pelas áreas NATURA 2000. Um exemplo típico deste tipo de medidas pode ser a restrição de utilização de sais de degelo de estradas em áreas sensíveis ou o exemplo mais abrangente da proibição de uso de gasolina com chumbo.

As metodologias destinadas a evitar a emissão na origem de um determinado tipo de contaminação prendem-se geralmente com a concepção de uma determinada estrada de forma a impedir que atravesse uma área sensível, defendendo dessa forma a contaminação nessa área. Este tipo de acção é radical, pelo que implica claras justificações dado os elevados

custos de construção que geralmente comporta, bem como os custos na fase de exploração resultantes de um consumo mais elevado de combustível no caso da extensão da estrada ter sofrido incrementos.

As metodologias de redução da contaminação na origem são implementadas quando as emissões de contaminantes não podem ser evitadas. Estas podem ser tomadas através de diversos tipos de restrições de tráfego em zonas sensíveis, como imposição de limites de velocidade ou de fluxo de tráfego ou a restrição de transporte de substâncias perigosas. Outro tipo de medidas de redução da contaminação que pode também ser considerado é a própria selecção dos materiais de construção da estrada que permitam um maior isolamento ou redução de contaminantes (asfalto poroso que permite maior retenção de contaminantes até à sua lavagem).

A **minimização durante o percurso** pode ser conseguida através de métodos de reorientação e de intercepção. Os primeiros permitem divergir as águas de escorrência de uma área sensível para fora do local, p.e. até uma infra-estrutura de tratamento. Os segundos são medidas técnicas que permitem a intercepção de escorrências poluídas. Essas intercepções podem ser as próprias infra-estruturas de tratamento (cf. Fig. 31), como bacias de detenção ou de infiltração, ou barreiras de tratamento, como barreiras reactivas.



Fig. 31 - Bacia de tratamento à saída de uma zona cársica da Eslovénia (cortesia de M. Brenčič)

No caso de um determinado poluente atingir o seu destino final (massa de água, neste caso), o seu impacte pode ser reduzido através de **metodologias de minimização no destino** que incluem a reabilitação e métodos de compensação.

A utilização de metodologias de reabilitação apenas é possível quando se observa um efeito adverso num compartimento ambiental que se pretendia proteger, por exemplo a qualidade da água imprópria para consumo humano ou a morte de peixes num rio. Uma forma drástica de reabilitação é a própria substituição do solo e outras áreas contaminadas por material limpo, embora esta opção deva ser tomada após outras tentativas de tratamento. Por outro lado, a

reabilitação não é uma medida de actuação contínua, mas serve sim para resolver uma situação determinada e finita no tempo.

Os métodos de compensação encontram-se no fim da linha de actuação, isto é, representam medidas económicas ou processos alternativos que visam recompensar os danos causados. Este tipo de medida pode ser aplicada quando uma determinada passagem de uma estrada danifica ou remove um determinado valor ambiental, por exemplo um habitat criado por uma zona húmida, e se prevê nos custos de construção da estrada a criação de uma nova área de valor ambiental equivalente que compense através da atracção para esse local das espécies afastadas com equivalente valor ecológico.

Os métodos de minimização apresentados podem ser vistos de duas perspectivas diferentes, consoante o domínio físico em que são aplicados:

- ◆ métodos *ex-situ* – implementados como medidas, não técnicas ou técnicas, aplicadas fora do ambiente da estrada;
- ◆ métodos *in situ* – implementados na estrada ou na sua vizinhança. Estes métodos podem ser definidos como medidas de intervenção ou de não-intervenção.

As medidas de intervenção implicam a acção humana, quer quando um problema é detectado ou por normal manutenção de um sistema (p.e. remoção de lixo à saída de um colector):

- têm o inconveniente de depender da garantia de atenção por parte dos responsáveis, o que nem sempre é possível, e necessitam de fundos após a fase de construção, quer para pessoal quer para equipamento ou manutenção, p.e. de energia;
- há, ainda, o inconveniente de não se prever de forma mais adequada as necessidades futuras de manutenção e de, muitas vezes, haver transição de responsabilidades da fase de construção para a de exploração sem que sejam transmitidos aspectos relativos à manutenção;
- a detecção de um problema é em muitos casos o ponto de partida para que uma determinada acção seja implementada; alguns dos problemas são facilmente detectáveis, como o caso de haver um acidente, mas há muitos casos em que não é fácil incentivar a investigação sobre um problema que provavelmente não existe.

As medidas de não-intervenção baseiam-se na instalação de equipamento que funciona durante parte da vida útil de um determinado projecto. Em geral são mais caras que as medidas activas quando se prevê funcionarem apenas para um ano ou dois, mas se se considerar o investimento para um funcionamento de longo prazo, já apresentam vantagem em relação às medidas activas.

As medidas referidas destinam-se a atingir um ou mais dos seguintes objectivos:

- ◆ bloquear qualquer contaminação potencial ou actual;
- ◆ ter um receptor instalado que permita detectar a presença de um poluente actual ou potencial e que permita prevenir a sua chegada a um receptor para o qual possa apresentar um risco;
- ◆ manter o regime de qualidade da água adjacente à estrada em níveis aceitáveis.

O conjunto de medidas acima referidas sistematizam as acções que devem ser postas em prática para minimizar os impactes negativos da contaminação das estradas. Importa que se analisem os riscos e as áreas mais sensíveis, neste caso do ponto de vista dos recursos hídricos subterrâneos, para que se protejam as áreas que assim o impliquem. Para esse efeito é fundamental que se identifiquem zonas sensíveis à contaminação rodoviária. Este assunto foi equacionado para o caso de Portugal (Leitão *et al.*, 2005a, b) através da apresentação de uma metodologia para a definição de zonas sensíveis aos contaminantes rodoviários, num trabalho desenvolvido no âmbito de um protocolo de cooperação entre o LNEC e o INAG para elaboração do Estudo "Avaliação e Gestão Ambiental das Águas de Escorrência de Estradas", que decorreu entre 2001 e 2004. Nesse trabalho introduziu-se o conceito de:

***zonas hídricas sensíveis aos contaminantes rodoviários*** que define zonas do domínio hídrico interior - subterrâneo e superficial, de transição e costeiro que, pelas suas características físicas e químicas intrínsecas, pelos seus usos e pelos ecossistemas que suportam constituem, separadamente ou cumulativamente, áreas mais sensíveis à contaminação gerada pela circulação rodoviária

As zonas sensíveis são entendidas no documento como áreas a proteger, para onde não se devem fazer descargas directas de águas de escorrência de estradas. Quando não é possível evitar tais descargas, então devem-se implementar sistemas de tratamento adequados, promovendo a diminuição da contaminação para níveis aceitáveis antes da descarga, de modo a garantir a protecção sustentável do recurso Água, tal como vem preconizado na Directiva-Quadro da Água.

A proposta apresentada permite diferenciar as áreas onde não se devem efectuar descargas directas de águas de escorrência, os meios onde isso não constitui problema e, ainda, as zonas entre estes dois extremos, que requerem uma avaliação específica através de uma análise casuística. Para este último caso foram estabelecidas características que as águas de escorrência e, os solos na área envolvente devem possuir para que seja permitida a descarga de águas de escorrência. A metodologia desenvolvida para a identificação de zonas hídricas sensíveis aos contaminantes rodoviários é apresentada sob a forma de um fluxograma.

Importa que esta metodologia e procedimentos propostos possam ser validados para diferentes situações e realidades ao nível da UE e outros países, para que haja procedimentos comuns na identificação de zonas sensíveis. Este é um dos assuntos posteriormente tratados neste trabalho, através de um Programa de Estudo apresentado na Secção 10.7.



No que diz respeito à contaminação com origem nos aeroportos não se conhece informação em Portugal para os solos e para as águas em áreas envolventes. É, naturalmente, uma matéria que importa aprofundar na medida em que é expectável a presença de contaminantes nas áreas envolventes e, nesse contexto, devem ser tomadas medidas no sentido de minimizar e conter os efeitos dessa contaminação, não só pelos funcionários que lidam com contaminantes e com os processos que geram a contaminação, mas também medidas globais de prevenção.

#### **6.4.1.3 Medidas de minimização da contaminação das águas de escorrência**

Este assunto tem sido abordado para Portugal em diferentes trabalhos, de que se destaca os apresentados em Barbosa (1999), Barbosa e Hvitved-Jacobsen (2000 e 2001), Leitão *et al.* (2005) e Barbosa e Fernandes (2008). Não é objectivo neste documento apresentar resultados neste domínio mas apenas de referir brevemente a informação existente a este respeito a nível nacional.

Barbosa e Fernandes (2008) apresentam uma sistematização das medidas de minimização utilizadas em diferentes países com base numa pesquisa bibliográfica efectuada bem como em visitas técnicas realizadas fora do País. Essa publicação que teve por objectivo abordar os métodos do controlo da contaminação das águas de escorrência de estradas em diferentes países, nomeadamente nos EUA e a França, além de Portugal. O referido trabalho apresenta métodos exemplificativos e não exaustivos de toda a prática nacional de cada um destes países.

Em Leitão *et al.* (2005) apresentam-se tipologias de tratamento e critérios de dimensionamento adequados à realidade portuguesa. Propõem-se três tipos diferentes de tipologias de tratamento, nomeadamente as bacias de detenção, as bacias de infiltração e as valas relvadas, e enunciam-se critérios para o seu dimensionamento. Esta proposta teve por base o conhecimento técnico e científico internacional sobre a eficácia destes tipos de sistemas, os dados resultantes da monitorização do funcionamento dos sistemas do IP 4, A1 e A6 e ainda o conhecimento dos contaminantes rodoviários e dos processos físicos, químicos e biológicos responsáveis pelo tratamento dos mesmos.

No trabalho referido teve-se em consideração a realidade nacional, não só no que respeita às características climáticas como a aspectos funcionais e culturais, como por exemplo, a autonomia do sistema, exigindo um mínimo de operações de manutenção. Por outro lado, questões ligadas à simplicidade do projecto e da construção, bem como aos custos associados, foram de alguma forma considerados. Assim, as configurações propostas têm também como objectivo uma redução da necessidade de manutenção.

A escolha do sistema de tratamento mais adequado a cada situação deve ser feita

critérios pelo projectista e equipa de EIA, pesando os diferentes factores intrínsecos à rodovia, sistema de drenagem e características das suas escorrências, bem como factores relativos ao meio ambiente, em particular geologia, hidrogeologia, topografia e ocupação da envolvente.

Em Portugal, várias infra-estruturas têm sido aplicadas no sentido de minimizar e prevenir a contaminação das águas de escorrência e assim dos meios hídricos envolventes em áreas consideradas mais sensíveis. Os critérios adoptados para essa definição de zonas sensíveis não obedecem a nenhuma metodologia em particular, nem as infra-estruturas a algum critério específico. A avaliação da eficácia das medidas de minimização implementadas em Portugal é apresentada na secção seguinte, na perspectiva do meio hídrico e solos adjacentes. A análise da eficácia das infra-estruturas de minimização de águas de escorrência não é aqui analisada, mas pode ser encontrada em Barbosa e Fernandes (2008).

#### **6.4.1.4 Importância das alterações climáticas**

A análise do potencial impacte das alterações climáticas na contaminação de estradas é um aspecto em análise, por exemplo no Reino Unido ([www.ukcip.org.uk](http://www.ukcip.org.uk)). As alterações prevêem que haja Invernos mais chuvosos e Verões mais secos e que a intensidade das precipitações seja maior (cf. Capítulo 9). Estes aspectos têm os seus efeitos ao nível do incremento da erosão de aterros junto às estradas bem como à formação de águas de escorrência com características distintas que deverão ser tidas em consideração.

"Road owners getting to grips with climate change" é um programa transnacional de investigação, iniciado pela ERA-NET ROAD (ENR) "Coordination and Implementation of Road Research in Europe", que é uma acção de coordenação do 6.º Programa-Quadro da UE. O seu principal objectivo prende-se com a análise da influência de alterações climáticas na infra-estrutura da estrada, cálculo de custos e benefícios, e de riscos. O efeito das alterações climáticas nas águas de escorrência não é contemplado.

#### **6.4.2 Avaliação da eficácia de medidas de minimização implementadas em Portugal**

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em colaboração com a Universidade de Évora, realizou para a Estradas de Portugal, S.A. (EP) um estudo, que decorreu recentemente, entre Maio de 2005 e Maio de 2008, intitulado *Avaliação da Eficácia das Medidas de Minimização de Impactes Ambientais Implementadas em Portugal*.

Os objectos principais desse estudo foram a análise e a interpretação da documentação existente, relativa à monitorização do meio ambiente envolvente à estrada tendo em vista a análise da eficácia dos sistemas de minimização de impactes ambientais implementados em

Portugal no âmbito dos recursos hídricos, dos solos, da fauna e do ruído.

Apresentam-se os principais resultados obtidos com base no trabalho desenvolvido por Leitão *et al.*, 2008, relativamente à componente dos recursos hídricos e dos solos. Com base no conjunto de dados e de informações disponíveis procedeu-se, até onde estes mesmos dados o permitiram, à identificação das causas subjacentes à maior ou menor eficácia dos sistemas (de minimização de impactes) e à inserção dessa informação numa base de dados.

A componente de avaliação da eficácia das medidas de minimização de impactes ambientais implementadas em Portugal no domínio das águas de escorrência de estradas, foi efectuada por meio de uma apreciação indirecta da análise da evolução da qualidade da água no ambiente envolvente.

Para o desenvolvimento da análise acima referida foi efectuada uma recolha, junto da EP, de toda a informação existente nos seus arquivos, em 2006, sobre a caracterização dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos junto a auto-estradas e a Itinerários Principais, tanto para a fase de construção como para a fase de exploração. Além dessa informação, inserida na Base de Dados MIA.mdb construída para este estudo, foi ainda analisada a informação disponível em trabalhos publicados em Portugal sobre os efeitos da contaminação de estradas nacionais, em exploração, na qualidade dos recursos hídricos da área envolvente.

O Quadro 19 apresenta a síntese da informação existente e o tipo de sistemas de tratamento a ela associados. Da análise do referido quadro constata-se haver 12 estradas para as quais existe informação sobre a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos e/ou dos superficiais.

Quadro 19 - Informação existente sobre a monitorização de recursos hídricos para análise de contaminação de estradas (Leitão *et al.*, 2008)

Designação da estrada	Designação do troço da estrada	Pontos de água monitorizados				Sistema de tratamento	
		Construção		Exploração		n.º	Tipo
		Subterrâneo	Superficial	Subterrâneo	Superficial		
A1	Fátima	-	-	2	-	1	Bacia de decantação
A2	Almodôvar -- S. Bartolomeu de Messines	-	12	-	14	-	-
A2	S. Bartolomeu de Messines -- VLA	18	12	11	12	6	Estações de tratamento
A2	Castro Verde -- Almodôvar	-	12	-	4	-	-
A6	Nó de Borba	-	-	4	3	3	Bacias pré-tratamento
A7/IC5	Basto -- Ribeira de Pena	47	3	-	-	-	Projecto não disponível
A10	Bucelas -- Arruda dos Vinhos	-	-	-	11	-	-
A13	Almeirim -- Salvaterra de Magos	2	-	-	-	-	-
A22/IC4	Alcantarilha -- Guia	-	-	-	2	3+1	Bacias de retenção e tratamento
A23/IP2	Ligação à Covilhã	-	-	2	1	4	Bacias de tratamento
A24/IP3	IP5 -- Castro D'Aire Sul	3	12	-	-	-	-
A24/IP3	Vila Real -- Régua (IP4)	-	4	-	4	2	Bacia multifuncional
A24/IP3	EN103 -- Chaves (Fronteira)	6	13	-	-	1	Vala relvada
IP4	Vila Real -- Vila Verde	-	-	1	-	3	Bacias de tratamento
A27/IP9	Nogueira -- Estorãos	2	4	-	-	2	Sistemas de contenção de risco
A27/IP9	Estorãos -- Ponte de Lima	7	5	-	-	2	Sistemas de contenção de risco
EN10	Recta do Cabo	-	-	2	-	-	-

A informação recolhida mostra que havia, até 2007: (1) seis troços com informação sobre as águas subterrâneas, cinco dos quais associados a sistemas de tratamento e (2) oito troços com informação sobre as águas superficiais, cinco dos quais associados a sistemas de tratamento.

Os autores referem que, em alguns casos, a informação é só de quantidade, como o caso da A7/IC5, Basto - Ribeira de Pena cujos dados correspondem a 47 pontos de água com dados de quantidade (caudais de nascentes e profundidade ao nível de poços e furos) e que em muito troços apenas há informação para a fase de construção, o que não permite analisar a eficácia de sistemas de tratamento.

O exemplo de uma das estradas onde foi identificada a presença de alguns contaminantes é a A2, S. Bartolomeu de Messines – VLA (cf. Fig. 32) onde, em relação aos hidrocarbonetos totais, verifica-se o aparecimento de concentrações muito elevadas na água em todos os pontos monitorizados entre Julho e Novembro de 2004, período a seguir ao qual se observa a tendência para a sua diminuição.

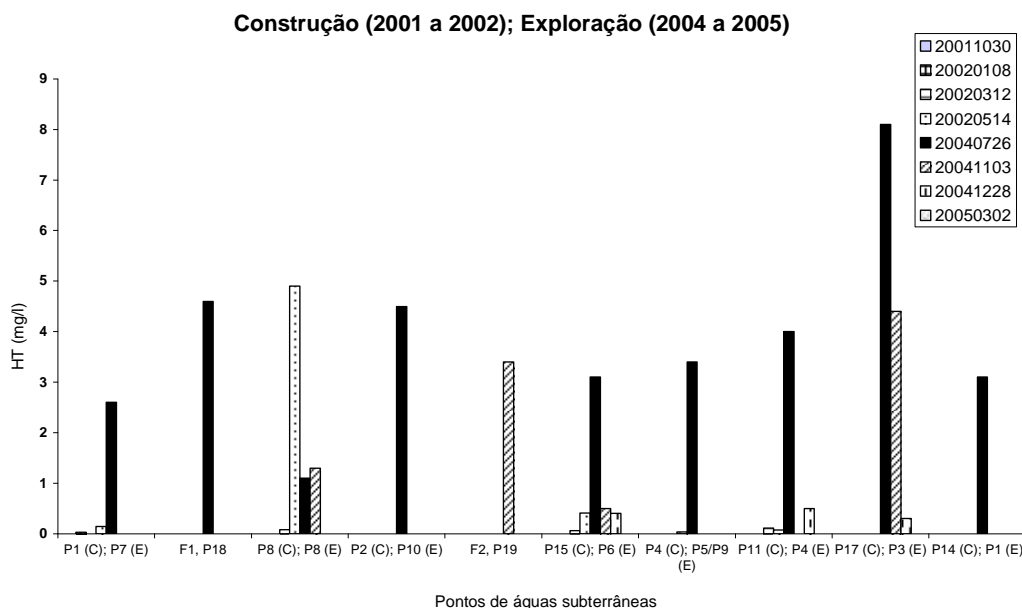


Fig. 32 - Concentração em hidrocarbonetos totais em amostras de águas subterrâneas monitorizados recolhidas junto à A2, S. Bartolomeu de Messines – VLA (Leitão *et al.*, 2008)

A presença de HT apresentada na Fig. 32 faz sobressair o facto de haver uma dispersão espacial do processo de contaminação, uma vez que os HT foram detectados em todos os pontos monitorizados e essencialmente para um mesmo período de tempo. Um efeito desta natureza faz supor que a origem de contaminação seja ela própria também espacialmente distribuída em toda a extensão de montante dos pontos amostrados, na medida em que localmente o escoamento subterrâneo se processa perpendicularmente à estrada.

Apesar da inegável relevância destes dados, os autores referem que os conhecimentos de que dispunham não permitem uma interpretação e explicação cabal destas ocorrências. Várias hipóteses poderão estar na origem da contaminação encontrada. É possível que esta contaminação por hidrocarbonetos possa ter tido origem ainda antes da fase de exploração e de operação da estrada e que a sua chegada tardia aos furos se deva ao tempo de percolação dos contaminantes até aos mesmos.

A investigação das hipóteses acima colocadas, bem como outras detectadas nos vários locais analisados pelos autores referidos, implica que se procure manter o programa de monitorização delineado para avaliar a evolução da qualidade da água para um período de tempo mais significativo. Por outro lado, a amostragem de solos ao longo da estrada e a diferentes distâncias da mesma poderá ajudar a encontrar a(s) origem(ns) e o percurso subjacentes a esta contaminação, designadamente avaliar a eventual ocorrência de um derrame accidental.

Um outro caso de estudo em que foram analisados os solos naturais da zona do nó de Borba, cuja síntese é apresentada na Fig. 33 permite verificar a presença de Zn, Pb e Cu nos vários solos analisados, embora abaixo do limite de intervenção holandês, e a ausência de Cd acima dos limites de detecção.

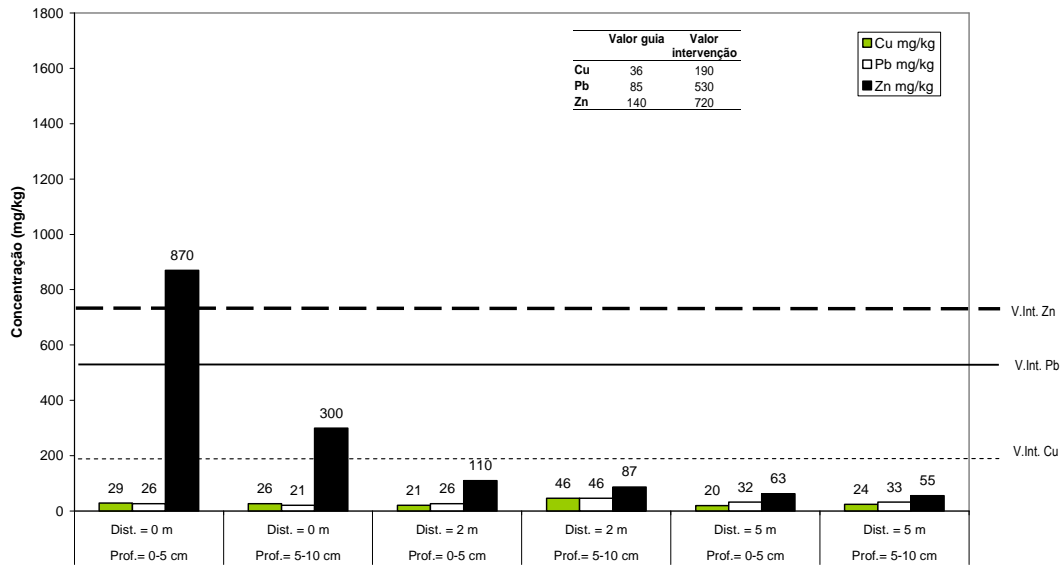


Fig. 33 - Concentração em metais pesados nos solos junto à A6, nó de Borba (Leitão *et al.*, 2005)

Destaca-se uma rápida diminuição da concentração em metais pesados nos solos com a distância à estrada e em profundidade, aspectos que corroboram a capacidade natural dos solos em reter contaminantes. A análise da Fig. 33 permite, ainda, verificar que o Zn é o metal pesado que surge em concentrações mais elevadas nos solos à saída da caleira. A presença de Cu e Pb, embora em baixas concentrações, denota uma contaminação cumulativa. O Cu apenas se apresenta acima do valor guia numa amostra. A concentração em Pb nos solos apresenta sempre valores inferiores ao valor guia. Solos com maiores CTC e conteúdo em matéria orgânica são também aqueles onde se registam as maiores concentrações em Zn. O padrão de concentração nos outros dois metais pesados não está bem demarcado.

Por outro lado, a apreciável capacidade dos solos da bacia em reter metais pesados, bem como óleos e gorduras das águas de escorrência, evitaria a migração para as águas subterrâneas subjacentes. Não obstante as boas características dos solos na retenção de contaminantes, o facto de as águas de escorrência serem lançadas numa bacia que é de infiltração impõe que esta capacidade seja mantida e assegurada ao longo do tempo de forma a evitar a contaminação localizada de águas subterrâneas.

Por comparação com o caso de estudo de Fátima, também avaliado, os valores de concentração em metais pesados é inferior em Borba, o que seria sempre expectável, dado o período de exploração de cada sistema (Fátima desde 1990 e Borba desde 1999) e o TMD muito superior na A1, Fátima. Para Fátima, os valores guia para o Zn, o Cu e o Pb (140, 36 e 85 mg/kg, respectivamente) são ultrapassados em todas as amostras a distâncias inferiores a 2 m da descarga de águas de escorrência. Para distâncias superiores a 2 m dos locais de descarga das águas de escorrência, os valores nos 3 metais pesados são já inferiores aos respectivos valores guia.

Em síntese, em Portugal, e atendendo aos casos analisados e sistematizados em Leitão *et al.* (2008), observa-se a contribuição potencial de outras fontes de contaminação nos locais de recolha de dados onde foi detectada contaminação e regista-se que muitos dos programas de monitorização são realizados com infra-estruturas desadequadas (p.e. furos captando a profundidades muito elevadas e/ou longe da estrada; equipamento do furo em liga metálica, etc.). Acresce que os poucos resultados que existem não abrangem, em muitos casos, as duas fases - de construção e de exploração - e, ainda, muitas das análises químicas da água são efectuadas utilizando limites de detecção de parâmetros demasiado elevados, inviabilizando a detecção de eventuais elementos presentes em concentrações apreciáveis. Por este motivo, torna-se imperioso que os programas de monitorização sejam adequados e que, sempre que possível, funcionem durante os períodos de construção e de exploração, para que essa monitorização a longo prazo permita ser conclusiva sobre os potenciais efeitos da contaminação de estradas nos recursos hídricos.

Por outro lado, é fundamental manter uma gestão adequada das infra-estruturas de minimização da contaminação de águas de escorrência de estradas construídas ou futuras. Esta premência deve-se ao facto de poder haver uma inversão dos objectivos para que foram projectadas as medidas de minimização, *i.e.* poder passar a haver uma concentração de contaminantes susceptíveis de serem libertados para os meios hídricos envolventes, caso os processos de retenção, tratamento, ou mesmo infiltração para que foram concebidos não estejam a desempenhar adequadamente a sua função.

## 6.5 Principais conclusões de projectos neste domínio

### 6.5.1 Estradas

O conjunto dos principais projectos europeus desenvolvidos nos últimos anos sobre a contaminação de estradas é sinteticamente referido. Apresenta-se, igualmente, uma breve síntese dos resultados desse conjunto de projectos.

**POLMIT** (*Pollution of Groundwater and Soil by Road and Traffic Sources: Dispersal Mechanisms, Pathways and Mitigation Measures*, 4.º Programa Quadro, 1997-2000, <http://cordis.europa.eu/transport/src/polmit.htm>)

Os **objectivos do projecto** desenvolvido por 7 organismos de investigação, em 7 países europeus (incluindo o LNEC/Portugal), foram melhorar o conhecimento científico (experimental) relacionado sobre a contaminação causada por estradas a nível europeu. Foi um vasto projecto multidisciplinar, de investigação ambiental, que teve os seguintes objectivos principais:

1. Determinação e análise da importância absoluta e relativa (comparativamente a outros tipos de contaminação) da contaminação causada por estradas.

2. Análise dos mecanismos de dispersão de contaminantes provenientes de estradas, nomeadamente os processos de migração no solo e nas águas subterrâneas.
3. Análise do impacte físico e químico dos contaminantes provenientes das estradas no solo e nas águas subterrâneas, a nível local e nacional.
4. Definição de normas (códigos) de melhores procedimentos para o controlo e/ou redução da contaminação.

O Projecto POLMIT desenvolveu-se em quatro grandes conjuntos de tarefas ou Work Packages que deram origem a resultados nos seguintes domínios:

- ◆ WP1 - Monitorização do transporte e deposição de contaminantes (metais pesados, PAHs, hidrocarbonetos, sais de degelo e herbicidas) em dois locais de estudo por cada um dos 7 países (Coordenador VTI);
- ◆ WP2 e WP4 - Cálculo de fluxos e balanço de massa de contaminantes, a nível local, nacional e à escala europeia (Coordenadores LNEC e VKI);
- ◆ WP3 - Agrupamento da informação existente e desenvolvimento de uma base de dados (Coordenador TRL) <http://www.trl.co.uk/polmit/>
- ◆ WP5: Desenvolvimento de medidas de mitigação e guia de boas práticas ambientais para projecto, construção e manutenção de estradas (Coordenador DWW).

Os casos de estudo analisados procuraram ser avaliados com recurso ao mesmo tipo de monitorização. A Fig. 34 apresenta uma representação esquemática de uma das áreas de estudo em Portugal, a Recta do Cabo, cuja contaminação foi avaliada em conjunto com o IP5, Vila Real – Vila Verde (Leitão *et al.*, 1999, Leitão *et al.*, 2000 a e b, e Diamantino, 2002).

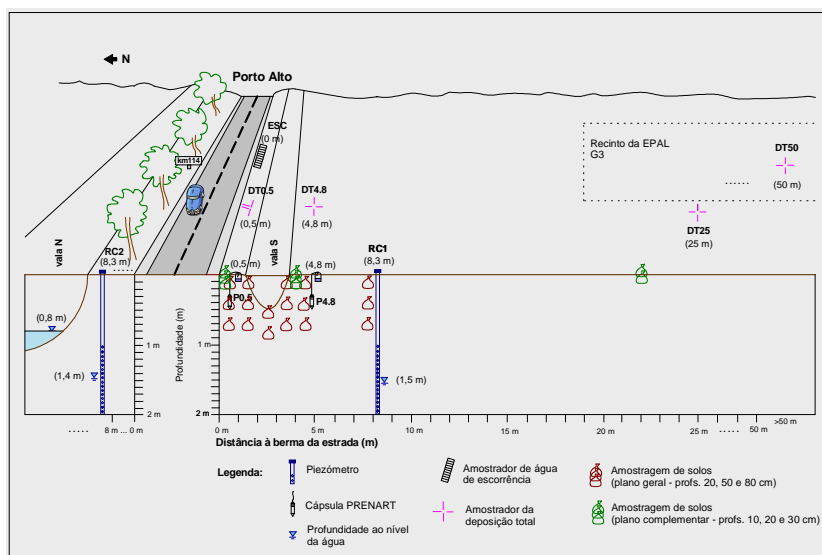


Fig. 34 - Esquema geral do plano de monitorização na EN10, Recta do Cabo (Diamantino, 2002)

Este projecto veio abrir uma nova área de reflexão a nível europeu sobre os efeitos das estradas no ambiente. Os principais **resultados do projecto** foram a identificação as fontes de



contaminação e os principais contaminantes envolvidos bem como os seus efeitos em diversos compartimentos do ambiente. Foram igualmente analisados os principais processos de migração dos contaminantes, os mecanismos envolvidos e os principais parâmetros físico-químicos com influência nos processos de migração.

A avaliação da contaminação realizada no âmbito das estações experimentais do projecto POLMIT permitiu retirar a conclusão geral de que o tipo de solo e a hidrogeologia do local influenciam significativamente a migração da contaminação. Tal, a par de outras condições como o padrão do tráfego e as condições meteorológicas, das características das águas subterrâneas como o pH, da dureza e da qualidade interferem com a mobilidade dos elementos, especialmente no caso dos metais pesados, uma vez que estas controlam a capacidade que o meio possui para formar colóides e determinam ainda a formação de possíveis espécies dominantes (móveis ou imóveis).

Outra conclusão importante, no padrão de migração da contaminação de estradas, deve-se às alterações verificadas na qualidade da água de escorrência ao longo do ano. Em alguns casos, a utilização de agentes para o degelo mostrou poder interferir com a mobilização dos metais pesados. A mobilização de metais pesados deve-se provavelmente ao aumento das concentrações de sódio, cálcio e cloreto. O sódio e especialmente o cálcio, são vulgarmente conhecidos por mobilizarem os metais através dos processos de troca iónica. A presença de concentrações de cloreto elevadas poderá também induzir a formação de espécies móveis de metais pesados. Um aumento pronunciado de concentração verificou-se especialmente no caso do zinco e do cádmio, que não são tão fortemente adsorvidos às partículas do solo como o cobre e o chumbo.

**ALT-MAT** (*Alternative materials in road construction*, 4.º Programa-Quadro, 1997-2001, <http://cordis.europa.eu/transport/src/alt-mat.htm>)

Os **objectivos do projecto** desenvolvido por 8 organismos de investigação, em 7 países europeus (não incluindo Portugal), foram: "to define methods by which the suitability of alternative materials for use in road construction can be evaluated. Within this ultimate objective, there are a number of particular objectives: (1) develop methods for simulated field tests; (2) determine mechanisms and rates of release of contaminants from alternative materials in road construction; (3) establish standard laboratory leaching tests for alternative materials; (4) determine appropriate mechanical and hydrodynamic tests for alternative materials; (5) prepare a specification for full scale trial embankments; (6) compare potential pollution with that from other sources; and (7) consider mitigation measures where possible".

**COST351 - WATMOVE** (*Water Movement in Road Pavements and Embankments*, 2003-2007, <http://www.watmove.org>)

Os **objectivos desta Acção Concertada** desenvolvida por 18 países europeus (incluindo Portugal), foram: "increase in the knowledge required to improve the highway performance and to minimise the leaching of contaminants from roads and traffic. The overall goal will be appreciated by the users of roads just as much as by pavement engineers as it is to improve pavement performance allowing less road closures, better use of the road network, longer service lives and more effective transportation of goods and people".

About every aspect of **Water Movement** in road pavements and in the earthworks of highways constructed, to allow roads to cross the landscape, was analysed. As water in the construction is one of the main causes of deterioration and premature distress of pavements and their supporting geotechnical structures, the project has concentrated:

- ◆ firstly on understanding water movement, water contents and their effects on the materials that comprise the highway construction;
- ◆ secondly on how contaminant migration is associated with water in the pavement and near-pavement hydrological environment;
- ◆ thirdly on measuring and describing the water location, quality and movement;
- ◆ fourthly on setting out possible mitigation strategies.

The principle output of the WATMOVE project is a book published by Springer, entitled "Water in Road Structures". In almost 400 pages, with the help of many illustrations, it gives full coverage of basic principles and more advanced theory, it sets out methods of measuring water and water flow, it describes best-practice in the collection of water samples, it explains modern laboratory tests and their interpretation, it shows how the value of and changes in the water condition effect soil and aggregate behaviour, it provides an introduction to the tools that are available to model water flow and its impact on the pavement and soil materials and ends with chapters that concentrate on practical solutions to ensure good drainage and control of contaminant migration.

### **Síntese resultados de projectos Europeus sobre contaminação de solos e de águas subterrâneas**

As conclusões obtidas por Leitão e Diamantino (2003), com base na análise de 37 casos de estudo permitiu evidenciar que as contínuas emissões de contaminantes provenientes da circulação automóvel provocam a acumulação de contaminantes ao longo dos solos e a sua migração para as águas subterrâneas da área envolvente às estradas. Este estudo apresenta os dados obtidos em áreas adjacentes às estradas cuja contaminação é causada apenas pela dispersão aérea dos contaminantes e pelo *splash* causado pela própria circulação. Não são, assim, analisados os locais para onde são lançadas directamente águas de escorrência de estradas, onde os teores de contaminação são evidentemente maiores, o que é o caso de algumas das análises efectuadas nos casos de estudo da A1 e da A2.

O estudo referido, cuja síntese dos resultados se apresenta, teve por objectivo compilar o maior número de informação possível por forma a averiguar, de uma forma geral para a Europa, e para um leque muito alargado de situações, o efectivo grau (intervalos de concentração) e extensão da contaminação (distância à estrada), independentemente de examinar as respectivas causas. Assim, analisaram-se situações espacialmente equivalentes de 37 casos de estudo publicados (Harrison *et al.*, 1981; Ward, 1990a; Ward, 1990b; García e Millán, 1994; Sánchez-Camazano *et al.*, 1994; Ward e Savage, 1994; Campo *et al.*, 1996; Reinirkens 1996; Legret e Pagotto, 1999; Leitão *et al.*, 2000; Pagotto *et al.*, 2001; Diamantino, 2002, cf. Leitão e Diamantino, 2003) integrando resultados cuja explicação se poderá dever a variadíssimos factores, tais como: tipo de pavimento, idade da estrada, localização (urbana, rural, auto-estradas, etc.), clima, geologia, tipo de solo, uso do solo (de florestas a terra arável), áreas de drenagem diferentes, presença de zonas de "pára-arranca", ou outro tipo de contaminação associada.

O estudo conclui que a contaminação é espacialmente limitada aos solos envolventes à estrada podendo, contudo, atingir os recursos hídricos em áreas mais afastadas. A contaminação caracteriza-se por um padrão geral de diminuição da concentração à medida que nos afastamos da estrada e em profundidade. Em muitos casos, os valores encontrados, quer para metais pesados quer para contaminantes orgânicos, não põem um problema imediato de contaminação. O efeito das descargas de águas de escorrência no ambiente não conduzem, de facto, habitualmente, a situações de contaminação pontual aguda nos solos ou nas massas de água. São, sim, os seus efeitos a longo prazo que originam fenómenos de contaminação.

Os efeitos directos da contaminação de estradas nos solos concentram-se na zona adjacente à estrada onde se verifica o *splash* dos carros e restringem-se a uma faixa que, geralmente, não ultrapassa a distância de 25 m da estrada (García e Millán, 1994; Reinirkens, 1996), embora haja uma forte dependência do tipo e da intensidade dos ventos dominantes. De facto, outros autores (Ward e Savage, 1994) relatam aumentos significativos do conteúdo de metais em solos amostrados a cerca de 100 m de distância à estrada (M25 de Londres) quando comparados com valores de referência. Estas conclusões são também suportadas pelas diferenças encontradas em análises efectuadas a vegetais lavados e não lavados cultivados nesses solos, observando-se que a maior concentração se fazia no pó ou partículas de solo sobre os vegetais. Também se observa que, para a maioria dos casos, a concentração em metais pesados decresce em profundidade.

O efeito do volume de tráfego no nível de contaminação do meio receptor pode ser dissimulado por outros factores tais como a direcção do vento, o regime de precipitação, a idade da estrada, a topografia, o uso do solo, entre outros.

Entre os principais contaminantes das águas de escorrência nos solos e nas águas subterrâneas encontra-se o grupo dos metais pesados, em especial o Pb, o Zn e o Cu. O Cd é

produzido em baixas quantidades, embora já tenha sido encontrado em concentrações apreciáveis nos solos envolventes. O Ni e o Cr provenientes das estradas não causam um significativo aumento das concentrações nos solos envolventes à estrada.

- ◆ O Cd é um elemento que apresenta concentrações sempre abaixo do denominado valor de intervenção (12 mg/kg) e do VMA (5 µg/l) definidos para os solos e para as águas subterrâneas, respectivamente.
- ◆ O Cu é um elemento que foi encontrado nos solos e nas águas subterrâneas em quantidades apreciáveis associado à contaminação por estradas (DWW, 1995; Reinirkens, 1996; Leitão *et al.*, 2000 e Diamantino, 2002). As concentrações de Cu nos solos analisados ultrapassam com alguma frequência o valor guia (36 mg/kg), em especial para o primeiro horizonte do solo e nas áreas mais perto das estradas, mas raramente o valor implica intervenção (190 mg/kg). Relativamente às concentrações em meio aquoso, a maioria dos valores de concentração é moderada e abaixo do VMA (50 µg/l).
- ◆ A concentração em Cr nos solos dos 26 casos de estudo analisados apresenta valores abaixo do valor de intervenção definido na legislação holandesa (380 mg/kg). O valor guia (100 mg/kg) é, contudo, frequentemente ultrapassado. Relativamente às concentrações em meio aquoso, a maioria dos valores de concentração é baixa, claramente abaixo do VMA (50 µg/l).
- ◆ A presença de Pb nos solos é registada na maioria dos casos de estudo e as concentrações observadas estão com muita frequência acima do valor de guia (85 mg/kg) e em vários casos acima do próprio valor de intervenção (530 mg/kg). Para as águas o valor equivalente ao VMR é muito ultrapassado, mas nunca o VMA (50 µg/l), embora haja casos em que se encontram valores muito próximos.
- ◆ As concentrações de Zn nos solos de 37 locais ultrapassaram o valor guia de 140 mg/kg em diversas situações para as 3 profundidades analisadas e as 3 distâncias da estrada. Quanto à qualidade das águas subterrâneas observa-se a presença de Zn na maioria dos casos, muitas vezes com valores acima do VMR (50 µg/l) e muito próximo do VMA (300 µg/l).
- ◆ Os contaminantes orgânicos constituem o segundo grupo de contaminantes principais. Entre estes os PAHs e os hidrocarbonetos totais são aqueles que são usados mais frequentemente como indicadores deste tipo de contaminantes.

Relativamente a estes contaminantes, observa-se que as concentrações dos 10 PAHs analisados estão abaixo dos limites de detecção para a maioria dos casos, havendo excepções. Quanto aos hidrocarbonetos totais e aos óleos e gorduras registaram-se valores

bastante elevados nos solos e nas águas subterrâneas, sendo um factor de contaminação a atender.

### 6.5.2 Aeroportos

Apresenta-se uma breve síntese dos resultados alcançados num conjunto de projectos de índole europeia e também dos EUA, no domínio da contaminação em aeroportos.

***Environmental Impacts of America's Airports*** ([http://www.rcaanews.org/nrdc\\_FOC.pdf](http://www.rcaanews.org/nrdc_FOC.pdf))

Em 1995, o Natural Resources Defense Council (NRDC) dos EUA conduziu um estudo a nível nacional cujos objectivos eram determinar quais: (1) os aspectos ambientais ligados a aeroportos que assumiam maior relevância e (2) as melhores técnicas de gestão em uso para mitigar os problemas ambientais encontrados. Os dados utilizados provieram de um inquérito nacional aos 125 aeroportos mais movimentados daquele país, em termos de número de passageiros e de aterragens, dos quais 46 deram resposta. Em complemento, o NRDC desenvolveu investigação através das agências governamentais aos 50 aeroportos mais movimentados. Os aspectos ambientais analisados incluíram o ruído, a ocupação do solo, o degelo e outros aspectos de qualidade, a contaminação do ar e, a uma escala mais global, as alterações climáticas e a poupança de energia.

Os resultados do estudo permitiram verificar que, apesar das diferentes dimensões e características geográficas, havia um conjunto de impactes ambientais comuns aos vários aeroportos analisados.

No que diz respeito aos aspectos de qualidade da água, o mesmo estudo conclui que:

- ◆ 45 dos 50 aeroportos mais movimentados se situam a menos de 5,5 km de um corpo de água - tal como oceano, baía, lago, zona húmida, reservatório, rio ou ribeira - e que muitos dos aeroportos não têm infra-estruturas que permitam controlar elevados volumes de fluidos usados para o degelo;
- ◆ os sistemas de gestão das águas de escorrência que se exigem aos aeroportos, no âmbito dos sistemas de drenagem de águas, é problemático, com falhas em termos de padrões para os efluentes, exigências e monitorização;
- ◆ o uso de produtos de degelo pode apresentar ameaças à saúde humana, em particular para os trabalhadores locais;
- ◆ além do glicoletileno, numerosas outras substâncias tais como solventes e metais são utilizadas em operações de manutenção.

Em cinco dos aeroportos analisados foram efectuados estudos sobre a qualidade das águas subterrâneas da área envolvente.

***Campagnes de prélèvements et d'analyses des eaux pluviales sur trois aéroports, França***  
(<http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/publications/documents/eauaero2/ficheseau2.pdf>)

Entre 1995 e 1997 o Service Technique des Bases Aériennes solicitou ao Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a realização de uma série de campanhas de amostragem e de análise das águas pluviais de três aeroportos de França: Nantes-Atlantique, Marseille-Provence e Lyon-Saint-Exupéry, numa série de 20 episódios de precipitação.

Estes aeroportos faziam parte de locais experimentais escolhidos com o fim de abarcar um conjunto distinto de condições climatéricas, geográficas e de tráfego.

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- ◆ há uma contaminação crónica nas águas de escorrência dos aeródromos; esta parece mais fraca que a encontrada noutro tipo de infra-estruturas, designadamente as estradas, embora os estudos conduzidos tenham sido realizados em condições onde não foi necessário o uso de produtos e degelo;
- ◆ as cargas contaminantes puderam variar do simples ao dobro, em função do período de tempo seco precedente ao episódio de precipitação, da intensidade da mesma, entre outros;
- ◆ a carga anual de sólidos suspensos totais parece ligada a factores climatéricos (humidade, vento, etc.) e às características da superfície do pavimento;
- ◆ a carência química de oxigénio e o conteúdo em hidrocarbonetos parecem ligados ao tráfego em causa;
- ◆ a concentração em azoto Kjeldhal, nitratos, cloretos e sulfatos são, geralmente, fracas e representativas da concentração de fundo do local;
- ◆ as concentrações em metais pesados são baixas.

O Quadro 20 apresenta os resultados obtidos que serviram de base para as conclusões referidas.

Quadro 20 - Cargas de contaminação anual por hectare impermeabilizado (Legret e Thirionet, 1999)

	Aéroports			Autoroute
	Nantes Atlantique	Marseille Provence	Lyon Satolas	A 11
Trafic	1 397 818 (1)	5 401 394 (1)	4 967 262 (1)	12 000 (2)
Matière en suspension (kg/ha)	54	223	65	371
Demande chimique en oxygène (kgO <sub>2</sub> /ha)	131	232	365	420
Azote total (kgN/ha)	5,3	7,9	8,2	10,2
Hydrocarbures (kg/ha)	0,3	3,3	3,4	5,8
Plomb (kg/ha)	0,027	0,09	0,053	0,308
Cuivre (kg/ha)	0,088	0,06	0,086	0,196
Cadmium (kg/ha)	0,006	0,01	0,022	0,006
Zinc (kg/ha)	0,225	0,63	0,495	1,736
Nitrates (kg/ha)	19,4	21,8	13,7	23,9
Chlorures (kg/ha)	29,2	21,6	44,3	2680
Sulfates (kg/ha)	62,6	88,5	26,7	318

(1) passagers 1996

(2) véhicules/jour

Em 2004, o Service Technique de l'Aviation Civile (STAC) de França lançou um questionário a vários aeroportos sobre a problemática da gestão dos solos, para o qual houve resposta de dez aeroportos: ADP, Bordeaux, Brest, Epinal, Fort de France, Grenoble, Lyon, Montpellier, Nice, Rennes, Strasbourg e Toulouse (Delrieu e Mars, 2007). Os resultados do inquérito permitiram estimar a frequência e a amplitude dos eventos (acidentes e incidentes) recentes que afectaram os solos, bem como as características da contaminação (natureza, impacte, medidas correctivas adoptadas, etc.). O mesmo estudo conclui que os eventos não são raros e nem sempre são menores. Predomina a contaminação por hidrocarbonetos.

## 6.6 Necessidades de investigação

As necessidades de investigação diagnosticadas para os dois domínios analisados, *i.e.*, estradas e aeroportos, centram-se: (1) para o caso das estradas, na necessidade de definir, à escala europeia, critérios para caracterizar zonas sensíveis aos contaminantes rodoviários e (2) para o caso dos aeroportos, em metodologias de análise e de avaliação da contaminação de águas subterrâneas e de solos em zonas envolventes de aeroportos.

No âmbito dos estudos efectuados nas última décadas sobre a análise da contaminação das estradas no ambiente foram identificadas metodologias de abordagem visando a prevenção e a mitigação da contaminação e um conjunto de medidas infra-estruturais adequadas à minimização da contaminação das águas de escorrência, embora esta área do conhecimento, como outras, se encontre em permanente desenvolvimento, sendo necessário actualizar as actividades de projecto, manutenção e monitorização em função dos resultados que forem sendo obtidos. Por outro lado, os principais tipos de contaminantes emitidos pela estrada, os processos responsáveis pela sua dispersão foram identificados, sendo necessário continuar os programas de monitorização, durante os períodos de construção e de exploração, de forma a permitir serem conclusivos sobre os potenciais efeitos da contaminação de estradas nos recursos hídricos.

Neste contexto, o trabalho desenvolvido pelo LNEC, para o INAG e para a EP apresenta: (1) um conjunto de directrizes relativamente aos programas de monitorização; (2) uma base de dados elaborada para a gestão e controle da informação que for sendo obtida; (3) directrizes para o dimensionamento de infra-estruturas para o tratamento de águas de escorrência. Ressalta como um dos aspectos mais importantes, que requer mais investigação e coordenação entre investigadores em diferentes países, justamente a identificação dos locais onde deve ser efectuada a aplicação de medidas de minimização (zonas sensíveis).

As zonas sensíveis são entendidas como áreas a proteger, para onde não se devem fazer descargas directas de águas de escorrência de estradas, pelo que o projecto da estrada deve desde logo evitar a sua afectação. Existem no entanto situações onde não é possível evitar tais descargas, devendo-se nesses casos implementar sistemas de tratamento adequados, promovendo a diminuição da contaminação para níveis aceitáveis antes da descarga, de modo a garantir a protecção sustentável do recurso Água definida na Directiva-Quadro da Água.

Importa que esta metodologia e procedimentos propostos possam ser validados para diferentes situações e realidades ao nível da UE e outros países, para que haja procedimentos comuns na identificação de zonas sensíveis. A proposta, a semelhança do proposto para Portugal, deverá permitir diferenciar as áreas onde não se devem efectuar descargas directas de águas de escorrência, os meios onde isso não constitui problema e, ainda, as zonas entre estes dois extremos, que requerem uma avaliação específica através de uma análise casuística. Este é um dos assuntos posteriormente tratados neste trabalho, através de um Programa de Estudo apresentado na Secção 10.7.

Em relação à componente da contaminação gerada por aeroportos, existe um grande desconhecimento da situação portuguesa, para os solos e para as águas em áreas envolventes, pelo que importa que seja criada uma metodologia de análise desta problemática que possa vir a ser aplicada em alguns aeroportos do País. É, naturalmente, uma matéria que importa aprofundar na medida em que é expectável a presença de contaminantes nas áreas envolventes e, nesse contexto, devem ser tomadas medidas no sentido de minimizar e conter os efeitos dessa contaminação, através de medidas globais de prevenção.

No Capítulo 10 propõem-se dois Programas de Estudos nestes dois domínios identificados como áreas com necessidade de investigação.





## **7 MINIMIZAÇÃO DO IMPACTE DE LIXEIRAS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

---

### **7.1 Introdução**

O modelo de funcionamento da sociedade contemporânea conduz a que sejam geradas diariamente enormes quantidades de resíduos sólidos que carecem ser isoladas de forma ambientalmente sustentável. De acordo com estimativas das Nações Unidas são gerados anualmente entre 1 e 1,3 mil milhões de toneladas de resíduos (WWDR 2, 2006). Esta produção de resíduos sólidos apresenta grandes disparidades de país para país e dentro do próprio país, com os EUA a liderarem a lista através de uma produção de cerca de  $\frac{1}{4}$  dos resíduos mundiais. Em 2003, a produção média de resíduos na União Europeia era de 1,6 kg/hab/dia que contrastam com os EUA e o Japão onde este valor chega a atingir os 3 kg/hab/dia. A produção de lixos pelos países mais pobres é muito menor, da ordem dos 0,35 a 0,45 kg/hab/dia.

Em Portugal Continental, de acordo com o PERSU II (2007), e com base nos dados obtidos pelo Sistema de Gestão da Informação sobre Resíduos (SGIR), a produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) atingiu as 4,5 milhões de toneladas em 2005, ou seja, cerca de 1,24 kg/hab/dia. Este valor cresceu cerca de 1 milhão de toneladas desde 1995, facto que é explicado pelos autores do estudo como o resultado do aumento do consumo e do crescimento económico no País.

Até há pouco mais de uma década, as lixeiras eram a forma mais comum encontrada para a deposição de todo o tipo de resíduos, não só Portugal como também no resto do mundo, sendo uma alternativa rápida, barata mas sem qualquer preocupação ambiental de longo prazo. A questão da gestão de resíduos e a deposição controlada de RSU em aterros sanitários apenas começou a ter expressão na Europa no final do século XX e deixou de ser um problema local para passar a ter regras, modos de concepção e de operação definidos a nível central.

Através da utilização de lixeiras, rapidamente se constatou que uma das principais ameaças de contaminação resultava dos lixiviados produzidos pelo contacto entre os detritos sólidos e a água de circulação, cuja origem se deve à precipitação, à humidade dos próprios detritos e às águas superficiais e subterrâneas que eventualmente estivessem em contacto com os materiais depositados. Estas foram e são uma importante fonte de contaminação de solos e de águas subterrâneas em diversas regiões.

De facto, a construção das lixeiras no passado não atendeu às características hidrogeológicas do meio onde se inseriam, pelo que muitas vezes se assiste a situações de poluição que poderiam ter sido evitadas caso se tivesse atendido à necessidade de escolher um ambiente hidrogeológico adequado à protecção das águas subterrâneas, designadamente se houvesse conhecimento sobre a profundidade a que se encontra a água subterrânea, a direcção do fluxo subterrâneo, as componentes horizontal e vertical do fluxo, a identificação de aquíferos presentes e as variações sazonais do nível freático. No entanto, muitas vezes acontece que estes aspectos nem sempre são compatíveis com o conjunto das restantes variáveis a que é necessário atender para a selecção de um local.

A tomada de consciência do efeito que os depósitos de resíduos sólidos em lixeiras constituem para o ambiente levou, não só a que fossem construídas novas infra-estruturas que permitissem o seu isolamento do meio natural envolvente, mas também a que o destino dos resíduos fosse só em última análise enviado para depósito privilegiando-se, em fases anteriores, a valorização de alguns desses resíduos e a minimização dos lixos produzidos em geral, através da sua reutilização, reciclagem ou redução.

A deposição controlada em aterros é planeada, projectada e construída de acordo com regras de engenharia destinadas a minimizar o seu impacto no ambiente, incluindo a necessidade de protecção da qualidade das águas subterrâneas na sua envolvente. Estas visam minimizar a produção de lixiviados através da impermeabilização da base e da cobertura, a compactação dos resíduos e controlo da entrada de água superficial. A gestão de resíduos não reutilizáveis ou recicláveis resulta das suas características, para que o armazenamento seja efectuado em locais apropriados, atendendo às suas propriedades físico-químicas.

As normas técnicas do projecto, construção e exploração de aterros construídos em Portugal no final da década passada encontram-se apresentadas em Neves *et al.* (2000). Nesse documento são apresentadas as condições mais apropriadas para a construção de novas infra-estruturas atendendo às propriedades geotécnicas do terreno no local e às características geológicas, hidrogeológicas e sísmicas com influência significativa na capacidade de suporte da fundação, na estabilidade de taludes, nos assentamentos ou potenciais levantamentos do leito do aterro e na protecção das águas subterrâneas e solos subjacentes.

A sustentabilidade ambiental do planeta e da economia no domínio dos resíduos passa muito

também pela redução da sua produção na origem, pelo que a contenção no uso de produtos e materiais não recicláveis é uma linha de actuação com forte incremento nas últimas décadas, que procura contrariar a usual tendência do crescimento da economia ser acompanhado pela delapidação de recursos naturais. Esta constituiu, aliás, umas das linhas dos Programas de Acção no âmbito do 6.º Programa-Quadro da UE que apelava expressamente para linhas de investigação que procurassem a cisão entre estes dois domínios.

Neste capítulo aborda-se a problemática associada ao passivo ambiental criado pelas antigas lixeiras (cerca de 300) parcialmente encerradas (seladas superiormente) no País. São locais onde continua a haver produção de lixiviado, embora em menor escala devido à sua cobertura não permitir a entrada de água da precipitação, uma vez que não houve qualquer isolamento da sua base com os solos e as águas subterrâneas envolventes. Este é um assunto que merece clara preocupação no âmbito do bom cumprimento da qualidade das águas subterrâneas em 2015, motivo pelo qual é tratado neste capítulo e é apresentado um projecto nesta área no Capítulo 10.

## **7.2 Situação em Portugal em 2007**

O modelo de gestão dos resíduos sólidos em Portugal conheceu importantes mudanças no final da década passada. A sua descrição e o seu planeamento encontram-se definidos no Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU, 1997). Este Plano estabeleceu importantes metas para a gestão dos RSU que incluíram: a desactivação de todas as lixeiras do País (cf. Fig. 35); a criação de diversos sistemas multimunicipais e intermunicipais para a gestão empresarial de resíduos sólidos urbanos; a construção de numerosas infra-estruturas de valorização e de eliminação, e o lançamento de sistemas de recolha selectiva multimaterial.

A par do cumprimento de boa parte das metas traçadas para 2005 no PERSU (1997), como por exemplo a erradicação das lixeiras (cf. Fig. 35 e Fig. 36), houve diversos objectivos que ficaram por cumprir, de que se destaca o aumento significativo da deposição em aterro como resultado das baixas percentagens de valorização orgânica dos resíduos, de reciclagem de materiais e de redução do ritmo de crescimento da produção de RSU que ficou muito abaixo do inicialmente preconizado (cf. Fig. 37).

Estes aspectos afastam-se dos desígnios traçados pelo 6.º Programa-Quadro da UE que tinha como um dos principais objectivos para o uso e gestão sustentáveis dos recursos naturais, conseguir uma redução significativa dos volumes de lixo gerados através de iniciativas de prevenção, de uma melhor eficiência no uso dos recursos e de uma viragem para uma produção e um consumo mais sustentáveis (EEA, 2005), reduzindo assim as emissões para o ar, os solos e as águas.

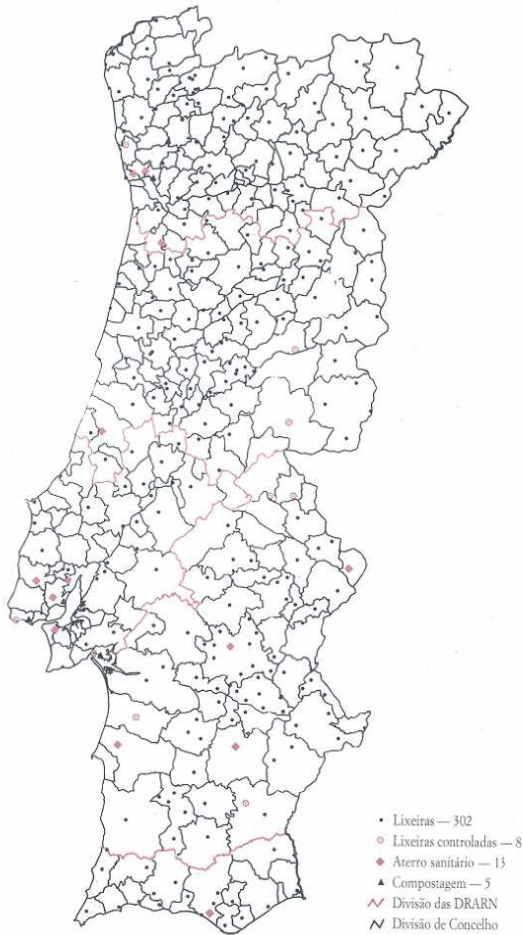


Fig. 35 - Localização do destino final dos resíduos sólidos em Portugal no final dos anos 90 (PERSU, 1997)

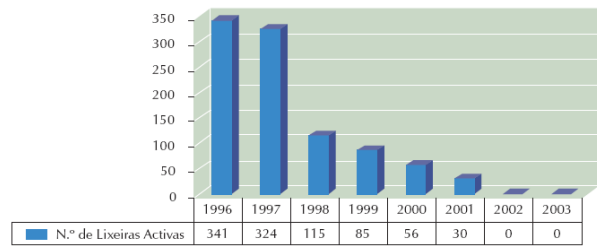


Fig. 36 - Evolução do número de lixeiras entre 1996 e 2003 (PERSU II, 2007)

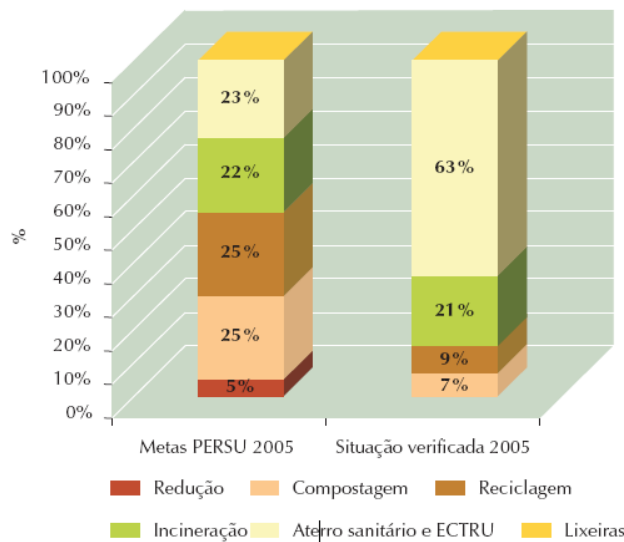


Fig. 37 - Comparação das metas definidas no PERSU I para 2005 e situação verificada nesse mesmo ano (extraído de PERSU II)

O Plano de Acção dos Resíduos Sólidos Urbanos (PARSU), 2000-2006, foi aprovado em 2000 pelo Instituto dos Resíduos e visou fazer uma avaliação da situação em 2000. Este Plano é essencialmente uma actualização das medidas já enunciadas no PERSU, medidas essas que foram revistas de forma a designar metas para alcançar os objectivos a que Portugal estava comprometido, no contexto europeu, para o período 2000-2006.

Concluídas as etapas de grandes investimentos estabelecidas no PERSU I, foi recentemente aprovado o PERSU II para o horizonte 2007-2016 (<http://www.maotdr.gov.pt/Admin/Files/Documents/PERSU.pdf>). Este Plano investe, agora, na consolidação das soluções de valorização, sejam por valorização térmica, valorização material (reciclagem) ou por valorização orgânica, procurando alcançar algumas das metas que ficaram aquém dos objectivos quantitativos previamente definidos no PERSU I. No PERSU II dá-se ainda um enfoque muito significativo à sustentabilidade dos sistemas plurimunicipais, propondo-se a reconfiguração e integração dos existentes com o desenvolvimento das entidades gestoras por fileiras: embalagens, pneus, óleos usados, veículos em fim de vida, etc.

Em termos quantitativos, a recente história dos RSU em Portugal permite verificar que em 1993, 93% da população beneficiava da recolha dos resíduos domésticos, embora em 1994 apenas fossem tratados de forma apropriada os resíduos de 42% da população. No final da década, em 1999, a taxa de recolha de resíduos domésticos era de 98% (PNPOT, 2006). Em 2001 foi atingida a meta de 100% de cobertura da população com serviços de gestão de RSU prevista no PERSU.

Pese embora a considerável percentagem de recolha de RSU (cf. Fig. 38), em 1995 o destino final desses resíduos era maioritariamente efectuado em lixeiras (76%), para passar em 2005 a ser a deposição em aterro (63%). Nesse ano verifica-se que a incineração com recuperação de energia constitui o destino final de 21% dos resíduos produzidos (cf. Fig. 38 e PERSU II).

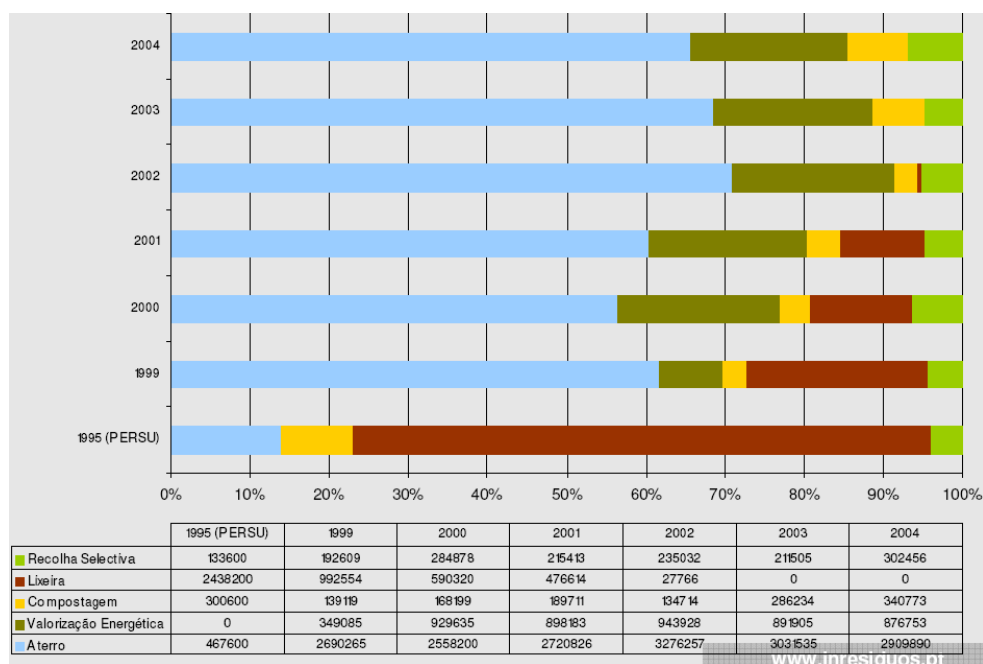


Fig. 38 - Destino final de RSU em Portugal Continental entre 1995 e 2004 (extraído de Pires, 2006)

A baixa valorização dos resíduos e da reciclagem contribuíram encurtar o período de vida útil dos aterros sanitários que actualmente é muito reduzido, de acordo com informação publicada em PERSU II, (2007). De qualquer forma, o processo de destino final de resíduos nunca se pode dar por concluído uma vez que os actuais sistemas necessitam de renovação após terminado o período para que foram construídos.

Em síntese, ressalta de entre as acções com maior impacto mais positivo para o ambiente, o encerramento, na década de 90, de mais de 300 lixeiras existentes no continente (Fig. 35) e da instalação em seu lugar de uma rede de infra-estruturas para a gestão adequada de resíduos sólidos urbanos, nomeadamente, aterros sanitários, ecopontos, estações de transferência e de triagem. Contudo, conforme atrás referido, nos locais onde se encontram as lixeiras continua a haver produção de lixiviado em resultado da falta de isolamento da sua base com os solos e as águas subterrâneas envolventes.

Uma vez que as lixeiras correspondem a uma fase em que não havia recolha selectiva ou reciclagem multimaterial, o estudo das pressões existentes na qualidade das águas subterrâneas implica que se caracterize a composição física média dos RSU em Portugal para esse período. A secção seguinte apresenta uma síntese da informação existente a esse respeito.

## 7.3 Contaminação proveniente de lixeiras e seus potenciais efeitos na qualidade das águas subterrâneas

### 7.3.1 Caracterização geral dos RSU em Portugal no final do século

Nesta secção apresenta-se uma breve descrição dos RSU em Portugal no final do século (anos 1993/95) de forma a introduzir os principais problemas de contaminação esperados para os locais envolventes de lixeiras. Existe informação mais detalhada sobre os RSU actualmente produzidos (e.g. PERSU II, 2007), mas que não é aqui apresentada visto saírem dos objectivos deste capítulo.

De acordo com o referido no PERSU (1997), *a informação disponível para caracterizar a situação técnica e ambiental dos RSU encontra-se limitada a duas fontes principais: a Direcção-Geral do Ambiente, que tem efectuado um tratamento e análise dos dados anualmente registados pelas autarquias através das Direcções Regionais do Ambiente e Recursos Naturais, e o estudo "Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos e Inventariação dos Locais de Deposição em Portugal, realizado pela Quercus em 1995" (Vieira, 1995 in PERSU, 1997).*

Segundo PERSU (1997), os dados considerados pela DGA como processáveis no que respeita a produção de RSU eram muito limitados (inferiores a 25%) e apresentavam deficiências nos períodos e formas de amostragem e divisão por materiais. Nesse contexto, a individualização de resíduos de origem doméstica de outros de origem comercial, industrial, hospitalar, sejam eles perigosos ou equiparados a RSU, era à data impossível. Este quadro dificulta a caracterização de uma situação de referência para os lixos depositados em lixeiras, embora exista uma avaliação aproximada da realidade à data, com base no tratamento estatístico dos resultados e na realização de estimativas consistentes (PERSU, 1997).

A capitação de RSU entre os anos 80 e 90 variou entre 0,7 kg/hab.dia e 1 kg/hab.dia, consoante o número de habitantes, sendo superior para os concelhos com população mais elevada. Por outro lado, verificou-se um aumento significativo da produção de RSU no final do século (cf. Quadro 21), o que extrapolando para o número de habitantes daria em 1995 uma produção aproximada de 3,75 milhões de toneladas. Note-se que, de acordo com o PERSU II, a produção de RSU atingiu os 4,5 milhões de toneladas em 2005.

Quadro 21 - Estimativa de produção de RSU em Portugal no final do século passado (adaptado de PERSU, 1997)

	1980	1987	1990	1993	1994
<b>Produção (10<sup>6</sup> t)</b>	1,946	2,627	2,969	3,149	3,750
<b>Capitação (kg/hab.dia)</b>	0,573	0,707	0,766	0,925	1,1

A caracterização dos RSU foi igualmente apresentada em PERSU (1997) com base em

estudos anteriores. A Fig. 39 apresenta uma síntese dessa caracterização efectuada com base num levantamento de 52 concelhos em 1993.

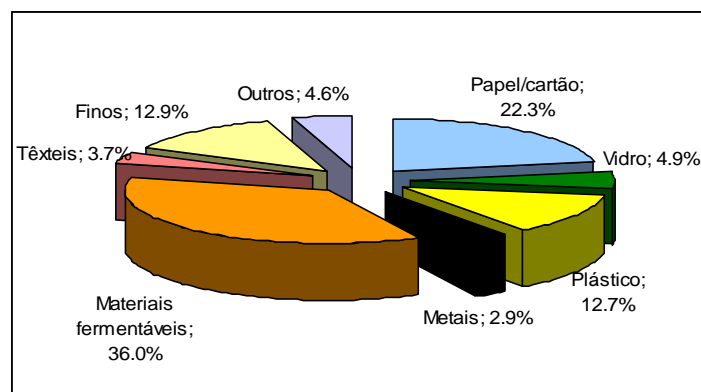


Fig. 39 - Composição física média dos RSU em Portugal – 1993 (Vieira, 1995, *in* PERSU, 1997)

O levantamento da situação apresentada em PERSU (1997) teve por principal objectivo a análise dos RSU tendo em vista a sua valorização e reciclagem. No contexto do presente estudo, o seu principal objectivo é identificar que tipo de pressões sobre a qualidade das águas é possível esperar em áreas envolventes de lixeiras tendo em atenção a caracterização física dos seus lixos.

### 7.3.2 Principais contaminantes

Com excepção de algumas zonas áridas, as lixeiras estão sujeitas à formação de lixiviado, em resultado da circulação da água no seu interior. A composição química dos lixiviados depende da natureza e da idade da lixeira e do grau de lixiviação.

De acordo com estimativas de 1993 da US EPA (Lee e Lee, 1993) nos Estados Unidos existiam cerca de 55 000 depósitos de RSU, 75% dos quais se encontravam a poluir as águas subterrâneas. A maioria destes sistemas encontra-se em locais que não foram seleccionados para o efeito, e cuja construção, operação e encerramento não teve quaisquer preocupações em termos de protecção das águas subterrâneas dos lixiviados gerados.

A carência de protecção da saúde humana, e do ambiente em geral, dos contaminantes produzidos pelos depósitos de RSU é uma das maiores desvantagens das lixeiras relativamente aos aterros de resíduos sólidos. A propagação de contaminantes em lixeiras para o ar, para os solos e para as águas deve-se à falta de controlo dos lixiviados produzidos, dos gases decompostos, dos odores e de todo o tipo de parasitas e pestes geralmente associados a este tipo de estruturas. A falta de isolamento destes depósitos permite, por um lado, o acesso aos mesmos e, por outro, a fuga de materiais aí depositados (p.e. plásticos que sejam arrastados pelo vento) que contribuem como aspectos negativos a salientar.



O lixo contido nas lixeiras provém de um conjunto de materiais urbanos, industriais e agrícolas utilizados pela sociedade, pelo que a sua composição varia de região para região e também com o tempo, à medida que se alteraram as formas de consumo (p.e. o aumento de plásticos nas últimas décadas) e as formas de valorização dos resíduos (p.e. diminuição de vidro por reciclagem).

De entre o conjunto de componentes de RSU existentes numa lixeira encontram-se os materiais fermentáveis, o papel ou cartão, os plásticos, os vidros, os têxteis e os metais, entre outros (cf. Fig. 39). Uma vez depositados em lixeiras, esses materiais reagem de forma distinta, transformando-se de acordo com um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos, colocando diferentes efeitos em termos de contaminação do meio ambiente envolvente (O'Leary e Walsh, 2008).

Os principais processos físicos devem-se à lenta compactação dos lixos ao longo de vários anos, em resultado do seu próprio peso e da redução do volume proporcionada pelos processos de decomposição de matéria orgânica. Os processos químicos e biológicos são potenciados pela água que entra na lixeira (em geral refere-se a água de precipitação mas pode também resultar de escoamento superficial, de contacto com a superfície piezométrica ou de irrigação) que permite que substâncias solúveis se dissolvam e que migrem como lixiviados para zonas mais profundas na lixeira ou para as águas subterrâneas subjacentes.

Os processos de degradação química e biológica, e em especial a biodegradação da fracção orgânica, resultam de um complexo conjunto de processos através dos quais os microrganismos transformam a matéria orgânica em compostos minerais e gasosos. Estes processos de degradação passam por diferentes etapas caracterizadas pela actuação de diferentes microrganismos e diferentes reacções químicas e seus produtos.

As reacções químicas geralmente envolvem oxigénio, ácidos orgânicos, dióxido de carbono, com a produção de biogás, em especial dióxido de carbono e metano, e as reacções biológicas são essencialmente representadas pela quebra das ligações de matéria orgânica.

A composição dos lixiviados em aterros depende do tipo de resíduos sólidos depositados, das condições climáticas, do modo de operação e da maturidade biológica do próprio aterro. A quantidade de escoamento superficial produzido depende ainda da inclinação superficial, permeabilidade e cobertura vegetal do solo, a topografia e geologia do terreno, entre outros. Deste modo, a estimativa da produção de lixiviados em lixeiras pode ser calculada com base em informação sobre dados climáticos locais, as características dos resíduos sólidos (humidade inicial, capacidade de retenção de água, etc.) e às características da própria lixeira (tipo e quantidade do material de cobertura, modo de operação, caso exista, etc.).

As principais características qualitativas dos lixiviados habitualmente identificadas, na medida em que condicionam o esquema de tratamento, são: concentração e biodegradabilidade do

material orgânico, concentração de azoto amoniacal e conteúdo em metais pesados.

A contaminação de solos e de águas subterrâneas proveniente de lixeiras – o principal objecto de análise deste documento - deve-se principalmente à infiltração do lixiviado produzido que, não sendo drenado nem captado como num aterro sanitário, é infiltrado no solo subjacente ao aterro, induzido por uma carga hidráulica excessiva. A inexistência de uma drenagem adequada contribui não só para a migração dos lixiviados para os solos e águas envolventes, mas também para a instabilidade estrutural do sistema.

Do conjunto de componentes de RSU existentes nas lixeiras em Portugal (cf. Fig. 39) é esperado um conjunto de processos que se referem nos parágrafos seguintes.

Os **materiais fermentáveis** podem ser lixiviados para as águas subterrâneas sob a forma de dióxido de carbono, ácidos orgânicos, fenóis, amónia, nitritos, nitratos, sulfatos, fosfatos e carbonatos ou ser emitidos para a atmosfera sob a forma de gases como dióxido de carbono, metano, ácidos voláteis, sulfureto de hidrogénio, azoto, etc. Ainda o material remanescente nas lixeiras pode existir sob a forma de amónio, carbono, fósforo e potássio.

O **papel ou cartão** podem ser lixiviados para as águas subterrâneas enquanto dióxido de carbono, fenóis, amónia, nitritos e nitratos. Pode também escapar para a atmosfera sob a forma de gases como dióxido de carbono, ácidos voláteis, sulfureto de hidrogénio, azoto e amónia. O material remanescente nas lixeiras pode ser incorporado sob a forma de amónio, carbono, fósforo e sulfuretos.

Os **plásticos** e o **vidro** são um tipo de material essencialmente inerte numa lixeira.

Os **têxteis** permanecem nas lixeiras como um material inerte ou relativamente inerte embora possam ser oxidados e reduzidos ou incorporados no protoplasma microbiano como amónia, carbono, fósforo e potássio. Os produtos de têxteis passíveis de serem lixiviados para as águas subterrâneas são os dióxidos de carbono, cetonas, ácidos orgânicos, sulfatos, fosfatos, amónia, nitritos e nitratos.

Os **metais** podem ser lixiviados para as águas subterrâneas sob a forma de sulfatos, bicarbonatos e óxidos.

A presença deste conjunto de materiais e de elementos químicos associados dependem do estágio de degradação existente (Russo, 2005). Inicialmente os lixos passam por um estágio de decomposição aeróbia com a produção de dióxido de carbono, água e nitratos para mais tarde (de algumas semanas a escassos meses), aquando da ausência de oxigénio, serem os microrganismos anaeróbios a predominar. Uma vez em condições anaeróbias, passa-se a um 2.º estágio em que predominam as bactérias fermentativas, acetogénicas e metanogénicas degradando os ácidos para metano e dióxido de carbono com a libertação de gás sulfídrico e

de compostos orgânicos sulfurosos (mercaptanos) (cf. Fig. 40). O estágio final é definido quando os processos do segundo estágio continuam mas de uma forma mais lenta (O'Leary e Walsh, 2008).

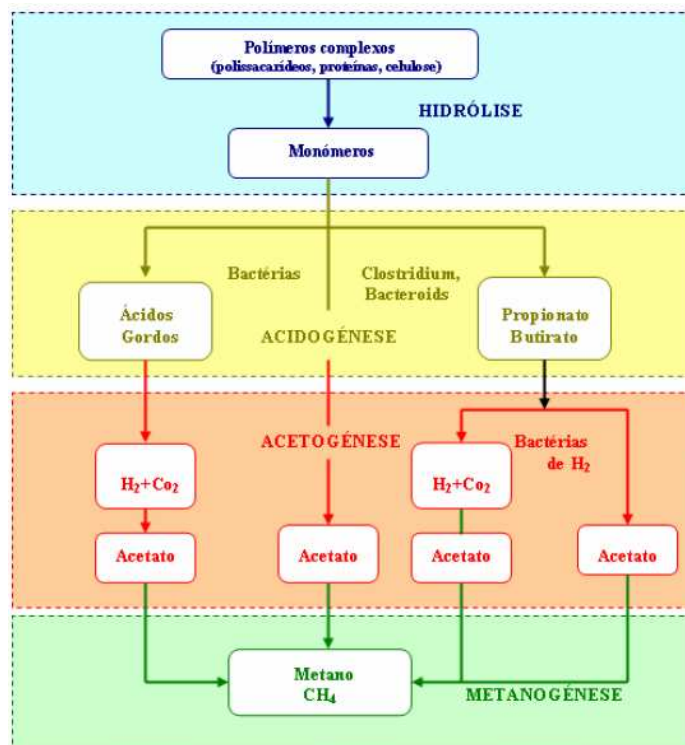


Fig. 40 - Esquema das conversões anaeróbias de depósitos de RSU (extraído de Russo, 2005)

Segundo os mesmos autores, o primeiro estágio anaeróbico caracteriza-se por baixo pH e baixa produção de metano, e por elevada produção de ácidos voláteis, carência química de oxigénio e condutividade eléctrica. Posteriormente, observa-se um aumento do pH para valores próximos do neutro e uma diminuição da carência química de oxigénio.

As características qualitativas das cargas poluentes dos lixiviados são constituídas, em especial, por matéria orgânica, por diversas formas de azoto, por substâncias inorgânicas halogenadas e por metais pesados. A determinação destes constituintes é geralmente efectuada através dos seguintes parâmetros: CBO<sub>5</sub>, CQO, COT, AO<sub>x</sub> NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NH<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr e Cd. O Quadro 22 apresenta um conjunto mais completo de parâmetros que podem ser analisados.

Contudo, a elevada heterogeneidade das características dos resíduos depositados, os complexos processos físicos, químicos e biológicos presentes nas diferentes fases de maturidade e, ainda, a sazonalidade de exploração do aterro e das características climáticas que determinam o balanço hídrico no sistema, concorrem para uma elevada heterogeneidade de características dos lixiviados em termos do tipo de elementos e da sua concentração. Observa-se uma significativa evolução das concentrações com a idade dos depósitos de RSU.

A título exemplificativo, apresenta-se no Quadro 22 as concentrações dos principais tipos de poluentes presentes nos lixiviados de RSU com base em dados obtidos em cerca de uma centena de lixeiras nos EUA (Lee e Lee, 1993), em valores médios apresentados por O'Leary e Walsh (2008) e nos dados apresentados por Russo (2005).

Quadro 22 - Concentrações típicas de lixiviado de RSU

Parâmetro	Concentrações típicas			Valor Médio			Aterros com mais de 10 anos	
	Freeze e Cherry (1979)	Lee e Lee (1993)	Russo (2005)	Lee e Lee (1993)	Russo (2005)	(O'Leary e Walsh, 2008)	Russo (2005)	(O'Leary e Walsh, 2008)
<b>CBO<sub>5</sub></b>	-	1 000 - 30 000	2 000 - 30 000	10 500	10 000	11 900	100 - 200	260
<b>CQO</b>	1 000 - 90 000	1 000 - 50 000	3 000 - 60 000	15 000	18 000	23 800	100 - 500	1 160
<b>COT</b>	200 - 30 000	700 - 10 000	1 500 - 20 000	3 500	6 000	8 000	80 - 160	465
<b>Total de ácidos voláteis</b>	-	70 - 28 000	-	-	-	5 688	-	5
<b>N Kjeldal</b>	-	10 - 500	-	500	-	-	-	-
<b>Nitrato</b>	0,1 - 10	0,4 - 44	5 - 40	18	25	13	5-40	4,4
<b>Amónia</b>	10 - 1 000	129 - 514	10 - 800	386	200	-	20 - 40	-
<b>Fosfato total</b>	1 - 100	0,5 - 50	5 - 100	30	30	-	5 - 10	-
<b>Ortofosfatos</b>	-	1,0 - 60	4 - 80	22	20	0,73	4 - 80	1,4
<b>Alcalinidade total (CaCO<sub>3</sub>)</b>	500 - 10 000	500 - 10 000	1 000 - 10 000	3 600	3 000	-	200 - 1 000	-
<b>SST</b>	-	3 000 - 50 000	200 - 2 000	16 000	500	-	100 - 400	-
<b>SDT</b>	5 000 - 40 000	1 000 - 20 000	-	11 000	-	-	-	-
<b>Condutividade eléct. (mS/cm)</b>	-	2 000 - 8 000	-	6 700	-	-	-	-
<b>pH</b>	4 - 8	5 - 7,5	4,5 - 7,5	6,3	6	6,2	6,5 - 7,5	7,5
<b>Cálcio</b>	100 - 3 000	100 - 3 000	-	1 000	-	1 820	-	250
<b>Magnésio</b>	100 - 1 500	30 - 500	-	700	-	7 252	-	185
<b>Sódio</b>	200 - 1 200	200 - 1 500	-	700	-	9 601	-	300
<b>Potássio</b>	200 - 1 000	-	-	-	-	780	-	590
<b>Cloretos</b>	300 - 3 000	100 - 2 000	-	980	-	1 315	-	2 080
<b>Sulfatos</b>	10 - 1 000	10 - 1 000	-	380	-	-	-	-
<b>Crómio (total)</b>	-	0,05 - 1	-	0,9	-	-	-	-
<b>Cádmio</b>	-	0,001 - 0,1	-	0,05	-	-	-	-
<b>Cobre</b>	< 10	0,02 - 1	-	0,5	-	0,12	-	0,03
<b>Chumbo</b>	< 5	0,1 - 1	-	0,5	-	0,4	-	0,14
<b>Níquel</b>	0,01 - 1	0,1 - 1	-	1,2	-	-	-	-
<b>Ferro</b>	1 - 1 000	10 - 1 000	-	430	-	540	-	23
<b>Manganés</b>	0,01 - 100	-	-	-	-	27	-	2,1
<b>Zinco</b>	0,1 - 100	0,5 - 30	-	21	-	21,5	-	0,4
<b>Mercúrio</b>	< 0,2	-	-	-	-	-	-	-
<b>Metano</b>	-	60%	-	-	-	-	-	-
<b>Dióxido de carbono</b>	-	40%	-	-	-	-	-	-

Nota: Concentrações em mg/l excepto pH e condutividade eléctrica

Além deste conjunto de contaminantes químicos mais convencionais há todo um conjunto de elementos não convencionais, em parte referidos na lista de substâncias prioritárias definidas

ao nível da UE (cf. Quadro 2 e Quadro 3), que podem ameaçar as águas subterrâneas em áreas de antigas lixeiras e que tem interesse ser analisadas, além dos reguladores endócrinos (provenientes de diversos medicamentos, pílula, entre outros) e outros elementos cujos efeitos a longo prazo no Homem e ecossistemas se desconhece. Efectivamente existem numerosos contaminantes, designadamente orgânicos, que devem fazer parte dos lixiviados em aterros. Lee e Lee (1993) referem que geralmente apenas são monitorizados cerca de 200 contaminantes de uma lista de mais de 60 000 produtos potenciais actualmente fabricados, muito dos quais se podem encontrar em lixeiras.

Os compostos orgânicos contribuem para os elevados valores de carência de oxigénio (BOD e COD) e são um dos importantes factores da formação de complexos orgânicos com metais, contribuindo desse modo para a sua propagação para as águas subterrâneas.

A presença de COT em elevadas quantidades no lixiviado de depósitos de RSU (cf. Quadro 22) ilustra a elevada presença de compostos orgânicos, embora apenas uma pequena fracção seja identificada (da ordem de alguns mg/l), o que mostra claramente o elevado desconhecimento da real composição do lixiviado e do perigo que os seus constituintes representam (Lee e Lee, 1993).

O desconhecimento dos actuais contornos da poluição em muitas lixeiras e a incerteza associada sobre os contaminantes dos lixiviados, implica que os programas de monitorização em áreas de deposição de RSU perdurem por décadas após o seu encerramento, na medida em que a produção de lixiviado continua, embora em menor escala. Freeze e Cherry (1979) relatam a produção de lixiviado em depósitos de resíduos construídos pelos romanos, há mais de 2000 anos!

A continuidade da produção de lixiviado durante várias décadas em depósitos e RSU, após o seu encerramento, é referida em nomenclatura anglo-saxónica como "dry tomb", na medida em que as condições de humidade são drasticamente reduzidas pela cobertura do aterro. Esta situação ameaça as águas subterrâneas não apenas em lixeiras mas também em aterros, já que a probabilidade de ruptura das geomembranas (também pelas características agressivas do lixiviado) e a permeabilidade, embora muito baixa, das argilas subjacentes não são projectadas para o longo período pós-encerramento (Lee e Jones-Lee, 2005). Nos EUA o período pós-encerramento é de 30 anos, durante os quais o operador responsável é obrigado a manter o seu bom funcionamento, o que inclui a monitorização das águas subterrâneas.

## **7.4 Principais conclusões de projectos neste domínio**

A maioria dos projectos realizados neste domínio abarca uma área mais vasta de poluição dos solos e das águas subterrâneas, sendo a poluição proveniente de lixeiras ou aterros um dos problemas equacionados. A informação existente sobre esta temática é vasta e, nesse contexto, foi criado um portal da Internet contendo informações e serviços a este respeito. Este

portal começou por ser um projecto do 5.º Programa-Quadro da UE que se mantém operacional, o EUGRIS.

Os projectos exclusivamente virados para aterros e lixeiras têm as suas áreas de investigação direccionadas para a valorização e a reciclagem de resíduos, aspectos que saem do domínio da protecção dos solos e das águas subterrâneas que se pretende aqui analisar.

Nos parágrafos seguintes apresenta-se uma breve síntese dos projectos mais relevantes para este Programa e os resultados neles alcançados.

**EUGRIS** (*European Sustainable Land and Groundwater Management*, 5.º Programa-Quadro da UE <http://www.eugris.info/>).

Os **objectivos do projecto** foram: developing a web portal offering information and services on topics related to soil, groundwater, and contaminated land. EUGRIS operates as a community of collaborating projects, people and organisations who co-operate to supply information for the benefit of everyone and also to promote themselves and disseminate their work.

Como **resultado deste projecto**: EUGRIS helps you to quickly find the information you need using simple search tools and/or structured access to information, based on topic country or type of information.

**NISMIST** (*Management of environmental risks associated with landfills in seismically active regions in the New Independent States of Central Asia*, EU contract INCO-STREP INCO-CT-2005- 516732, 2005-2008, <http://nismist.spb.ru/index.html>, 6.º Programa-Quadro).

Os **objectivos do projecto** desenvolvido por 8 organismos de investigação, em 8 países (não incluindo Portugal) são: focusing on assessment of risk and development of remedial recommendations for landfills (municipal tips) located in highly active seismic regions of the New Independent States (NIS).

Os principais **resultados deste projecto**, em curso, permitirão:

- ◆ development of a GIS database and classification catalogue for landfills in the participating NIS countries;
- ◆ dynamic analysis of seismic hazard of landfills for investigation of the mechanical and hydrological properties of waste mass, development of a constitutive model for the behaviour of waste mass and three dimensional numerical modelling of the seismic response of landfills;
- ◆ analysis of the emission potential of landfills will be performed by making use of the Landfill Simulation Reactors (LSR) in climatic chambers;
- ◆ risk analyses of the landfills to investigate the potential environmental and associated

- ◆ socio-economic impact of contaminant release, transport, dilution and fate;
- ◆ recommendations for remediation measures to reduce risk of existing landfills and guidance for site selection and for designing of future landfills will be made.

**CLEANSOIL** (*An innovative method for the on-site remediation of polluted soil under existing infrastructures*, EU contract INCO-STREP INCO-CT-2005-013420, 2005-2008, <http://soil.ss.msu.ru/projects/cleansoil/>, 6.º Programa-Quadro).

Os **objectivos do projecto** desenvolvido por 8 organismos de investigação, em 6 países europeus (não incluindo Portugal) é: to develop and promote a very simple and cost-efficient alternative to enable the on-site, in-situ treatment of hazardous substances, especially targeted for large areas of polluted land and causing minimum site disturbance. Therefore, the system is applicable to the remediation of soil below buildings, roads, pipelines, railroads, etc., for both local and/or diffuse contamination, and even for preventive applications.

Os principais **resultados deste projecto**, em curso, permitirão:

- ◆ to develop and to test an innovative, simple, easy to handle, applicable under existing infrastructures and cost-effective on-site and in-situ soil remediation method able to achieve a degree of soil remediation that allows its reutilisation for different purposes;
- ◆ to contribute to the development of methods for the remediation of contaminated soils up to the restoration of its vital functions applicable both in the EU and the NIS;
- ◆ to contribute to the development of methods able to avoid groundwater contamination and the spread of pollution from leaching;
- ◆ to gather deeper knowledge on pollutants adsorption processes in soils, by finding the most suitable sorbent materials and bacteria able to remove different pollutants in different soils;
- ◆ to strengthen the exchange of knowledge between EU and NIS scientists in an area of mutual interest.

**GRACOS** (*Groundwater Risk Assessment at Contaminated Sites*, EU contract EVK1-CT-1999-00029, 20. <http://www.uni-tuebingen.de/gracos/index.html>, 5.º Programa-Quadro).

Os **objectivos do projecto** desenvolvido por 7 organismos de investigação, em 6 países (não incluindo Portugal) são: to deliver groundwater risk assessment guidelines for soil-contaminations with organic and inorganic compounds.

The procedures to be developed take the form of a scenario approach, as it is intended to be generally applicable to different situations in terms of classes/combination of pollutants and site-specific conditions, such as climatic conditions, permeability and distance between contamination and groundwater table. Such a scenario approach will allow the determination a priori whether, under given site conditions (subsurface permeability, distance to groundwater

table, type of material) and contaminant properties (volatile / non-volatile / water soluble etc.), a minor, medium or high risk of groundwater pollution exists.

Os principais **resultados deste projecto** foram a validação dos procedimentos de análise de risco para:

- ◆ a well controlled field experiment which comprises an emplaced source of a hydrocarbon mixture consisting of volatile to semi-volatile, (partly) biodegradable compounds;
- ◆ laboratory and field investigations for the quantification of contaminant transfer rates across the capillary fringe for specific scenarios;
- ◆ column leaching tests for the quantification of the mobile contaminant fraction in various contaminated soils and waste materials (e.g. slag, bottom ash, construction/recycling materials), including long-term leaching of contaminants from specific materials;
- ◆ numerical modelling for vapour phase contaminant transport in the unsaturated zone.

Além dos projectos referidos, existe um conjunto de *Redes* que servem de plataforma para troca de conhecimentos entre investigadores de diferentes países. Referem-se algumas das mais relevantes.

**ANCORE** (*Academic network on contaminated land management in Europe*) provides a platform for the exchange of innovative know-how in the field of applied research for contaminated land and groundwater issues in the framework of an academic network. It aims to promote an active co-operation between the academic network partners and the owners of contaminated land (industry) and to identify research needs in order to provide an input to the EU-administration, industry, as well as researchers and students, in the field of contaminated land and groundwater (cf. [http://www.clarinet.at/library/epp\\_papers/r.pdf](http://www.clarinet.at/library/epp_papers/r.pdf)).

**CLARINET** (*Contaminated land rehabilitation network for environmental technologies in Europe*) primarily aims to develop technical recommendations for sound decision-making on the rehabilitation of contaminated sites in Europe. The network is active in various policy consultations, organising scientific seminars and publishing technical reports (cf. <http://www.clarinet.at>).

**SNOWMAN** (*Sustainable management of soil and groundwater under the pressure of soil pollution and soil contamination*) is focusing on coordination aspects of research programmes through the so-called ERA-NET scheme. The network aims to produce an overview of current research programmes in the specific field concerned and to develop a Vision Paper which will define the goal of European research activities in this specific field of environmental research. The ultimate goal is to implement and conduct a research programme on a bi-/multilateral level throughout Europe (cf. <http://www.snowman-era.net/index.php>).



## 7.5 Necessidades de investigação

A composição dos lixiviados em lixeiras ou aterros e os seus potenciais efeitos nos solos e nas águas subterrâneas envolventes depende da própria composição dos RSU nelas depositados. O desconhecimento dos resíduos, em especial no caso das lixeiras em Portugal - onde além dos resíduos domésticos foram também depositados resíduos hospitalares, industriais, e mesmo perigosos, para além de lamas e outras sucatas, demolição e construção, animais mortos etc. - conduz a que muitos dos contaminantes não estejam identificados nem quantificados, desconhecendo-se, por isso, as implicações para o Homem e restantes ecossistemas.

A informação existente no País é muito limitada e encontra-se dispersa por trabalhos realizados de uma forma não coordenada. Importa classificar a informação existente e incluí-la numa base de dados em SIG onde seja concentrada toda a informação relevante sobre as diversas lixeiras encerradas em Portugal, de modo a efectuar um ponto de situação do actual estado de contaminação dos solos e das águas subterrâneas das áreas envolventes, alguns anos após o seu encerramento.

Propõe-se escolher um conjunto de situações representativas das condições geológicas, hidrogeológicas, topográficas e climáticas onde seja caracterizada a efectiva dimensão das plumas de contaminação e caracterizada a capacidade natural de atenuação dos contaminantes que é proporcionada por cada meio hidrogeológico, face às restantes condições existentes.

Finalmente, importa aprofundar a análise de risco associado a antigas lixeiras e apresentar medidas de reabilitação apropriadas ao estado das lixeiras a analisar, bem como a outras lixeiras que apresentem condições equivalentes.





Envisat, 23 de Agosto de 2005

## **§ MINIMIZAÇÃO DO EFEITO DE CATÁSTROFES NATURAIS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: FOGOS FLORESTAIS**

---

### **8.1 Introdução**

As características climáticas, orográficas, geológicas e pedológicas condicionam sobremaneira a actividade agrícola e florestal desenvolvida em Portugal. A sua repartição e fragmentação no território podem ter uma considerável influência no potencial de ocorrência de fogos florestais.

Do ponto de vista climático, Portugal insere-se na região Mediterrânica do sul da Europa, *i.e.* uma franja ao longo da costa norte do mar Mediterrâneo, a partir de Portugal até à Turquia, incluindo a Córsega, Sardenha, Sicília, Creta e outras ilhas menores, onde as características climáticas se definem pelos típicos Invernos amenos e chuvosos, e Verões quentes e secos, onde por vezes não ocorre precipitação entre Maio e Setembro (Rackham, 2003). A precipitação pode variar muito de ano para ano, especialmente nas zonas mais áridas, e os seus valores podem oscilar desde mais de 3000 mm a menos de 200 mm.

Em termos orográficos, a região Mediterrânica é uma região muito variada, onde existem várias cadeias montanhosas com mais de 2000 m de altitude, muitas das quais se localizam perto do mar ou em algumas ilhas. Os locais situados a altitudes elevadas apresentam Invernos frios e Verões secos, e a época de cultivo pode ser muito curta (Rackham, 2003).

As características geológicas e pedológicas são muito variadas, o que permitiu que o Mediterrâneo fosse, desde há cerca de 7 000 anos, a sede principal do desenvolvimento agrícola europeu, verificando-se uma extensa utilização do solo para cultivo e uma elevada percentagem da população rural dedicada a esta actividade. Contudo, durante a segunda metade do século XX verificou-se um êxodo rural com migração das populações para as cidades, levando ao recuo da agricultura, também em zonas de montanha, e ao consequente aumento da vegetação natural (Rackham, 2003).

No seu conjunto, as características da Europa Mediterrânica, designadamente a sua localização geográfica, o clima de temperaturas elevadas no Verão e variabilidade interanual da precipitação, juntamente com o actual ordenamento agrícola e florestal que conduzem à abundância de vegetação arbustível (sob povoamentos arbóreos de pinheiros e eucaliptos, todos eles bastante inflamáveis), o abandono dos sistemas tradicionais de exploração da terra, os inadequados padrões de uso do solo, bem como uma reflorestação frequentemente inadequada, propiciam as condições necessárias para que esta região seja particularmente afectada pelos fogos florestais. Todos os anos mais de 50 000 fogos queimam uma área entre 600 000 e 800 000 ha, uma área comparável à ilha da Córsega, que representa 1,3% – 1,7% do total da floresta Mediterrânica (Olivella *et al.*, 2006). Efectivamente, o risco de incêndios florestais aumentou consideravelmente e, com ele, o risco da degradação física, química e biológica dos solos e a poluição dos recursos hídricos de jusante.

Os cenários reconhecidos das alterações climáticas apontam para o agravamento deste tipo de situações.

## 8.2 Situação em 2008

Países como Portugal, Espanha, Itália, França e Grécia são os Estados-Membros da União Europeia com maior índice de risco de deflagração de incêndios florestais e onde se registam as maiores perdas em termos de área florestal ardida. Os países mediterrânicos contribuíram com 94% da área total queimada da Europa, de acordo com dados estatísticos para os anos entre 1975 e 2000 analisados pelo Instituto Europeu da Floresta (Xanthopoulos *et al.*, 2006). A média da área total queimada nestes países quadruplicou desde 1960. Só em 2005, no conjunto destes cinco países, arderam um total de 589 559 hectares e o número de incêndios ultrapassou a média de anos anteriores, saldando-se em 73 325 sinistros ocorridos nos meses de Verão.

Entre 1966 e 2000, aproximadamente 12 000 ha de pinheiros (*Pinus pinaster* Aiton) foram destruídos anualmente por fogos em Espanha (Fernandez *et al.*, 2007). Mais recentemente na Grécia, entre Junho e Setembro de 2007, registaram-se mais de 3 000 fogos florestais, devido a condições de tempo extremamente quentes e secas e a ventos fortes. De acordo com o World Wide Fund for Nature - Greece foram destruídos mais de 177 265 ha entre 24 e 30 de Agosto. No total foram queimados 268 834 ha de floresta.

Em 31 de Julho de 2007 arderam 80 970 ha. Desta área 11 753 ha estavam em locais NATURA 2000.

Em Portugal, segundo MADRP (2006) e Pereira *et al.* (2004) (in PDR 2007-2013), os incêndios são um problema crescente nas últimas décadas, resultante do abandono da actividade agrícola e da criação de áreas contínuas de matos e de florestas, em particular quando geridas inadequadamente. Este abandono conduziu à criação de elevadas taxas de acumulação de biomassa na floresta que tradicionalmente vinha sendo usada como lenha ou nas camas de animais. Por outro lado, a divisão de propriedade encontra-se extremamente fragmentada, em especial nas regiões florestadas com maior risco de incêndio, o que dificulta a gestão e prevenção de incêndios.

Como consequência dos fogos florestais, agrava-se o abandono das terras, por motivos directos, e ainda como resultado do aumento da erosão do solo que reduz a produtividade das florestas em determinadas áreas e causa a desertificação de novas áreas, a contaminação da água e põe em causa a sobrevivência das espécies que dependiam dos seus recursos (Proença *et al.*, 2006, in PDR 2007-2013).

Em Portugal, o Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios (PNDFCI) refere que, desde 1980, arderam no nosso País mais de 2,7 milhões de hectares, dos quais 1,4 mha foram de área arborizada. Há anos particularmente maus, como o de 2003 (cf. Fig. 42) em que ardeu cerca de 5% da área do País e, entre Junho e Setembro de 2003, arderam mais de 280 000 ha de floresta de sobreiro, de azinho, de pinho e de eucalipto (áreas maioritariamente com gestão florestal), e 170 000 ha de matagais.

As Fig. 41 e Fig. 42 apresentam as áreas ardidas entre os anos 1990-1996 e 1997-2004. No PDR 2007-2013 refere-se que entre 1975 e 2003 as áreas ardidas anualmente quadruplicaram.

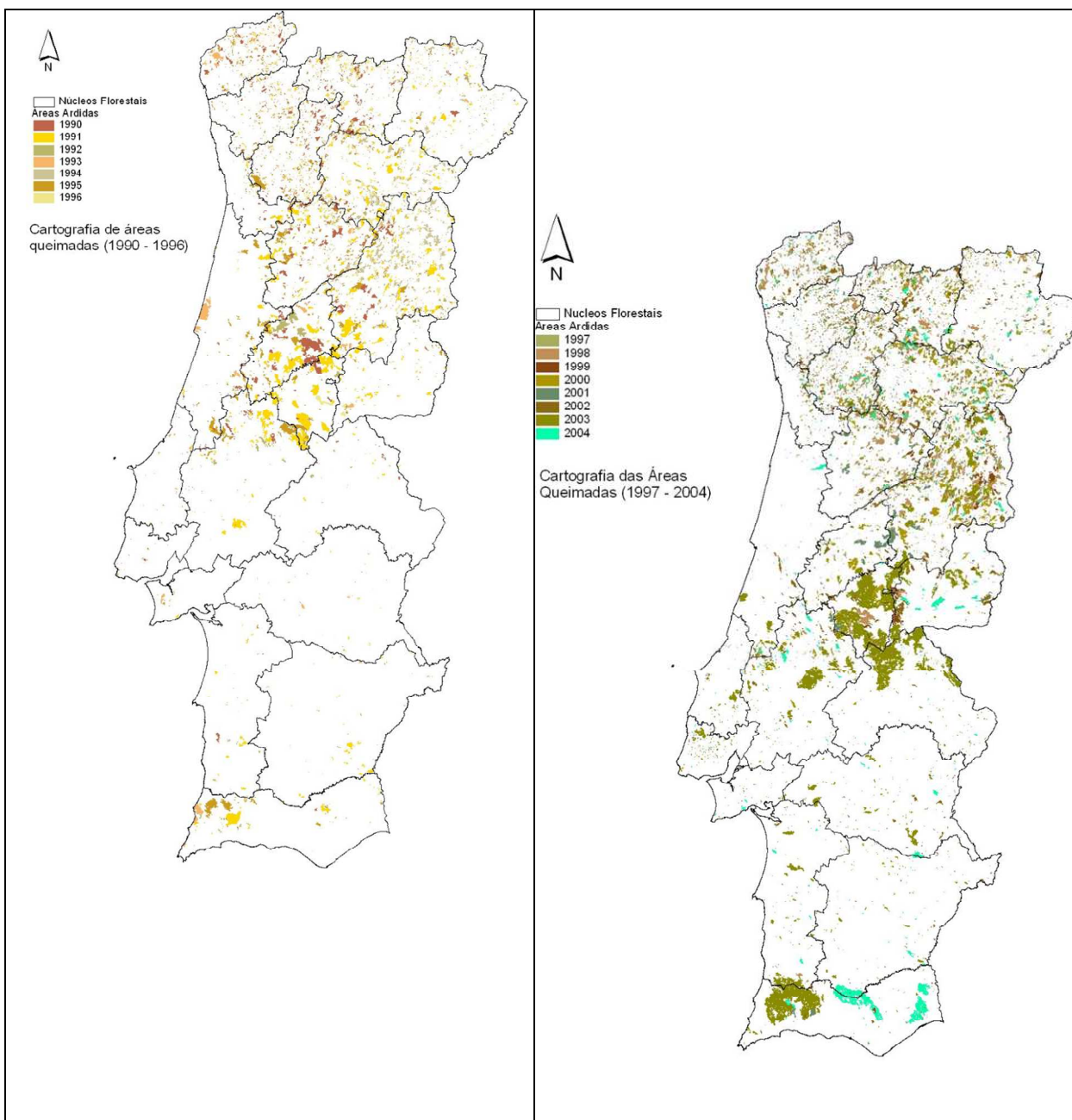


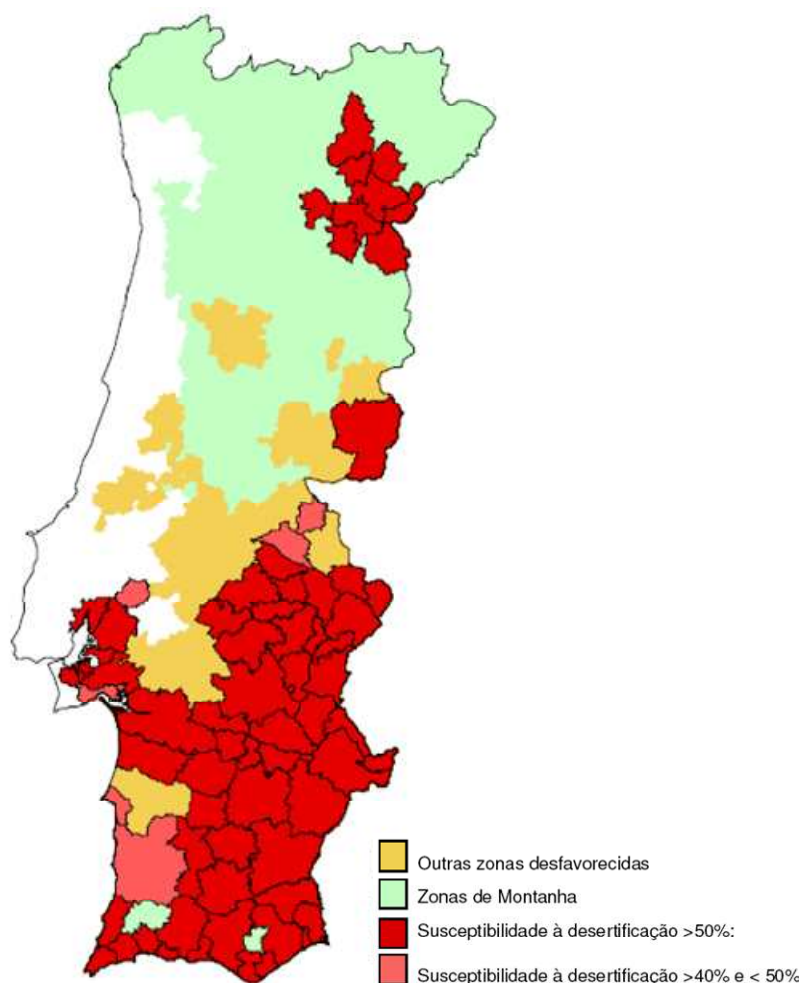
Fig. 41 - Mapas de áreas ardidas entre 1990-1996  
(extraído de Direcção-Geral de Recursos Florestais,  
<http://www.dgrf.min-agricultura.pt/portal/prevencao-a-incendios-dfci/informacoes/cartografia/mapas-de-areas-ardidas>)

Fig. 42 - Mapas de áreas ardidas entre 1997-2004  
(extraído de Direcção-Geral de Recursos Florestais,  
<http://www.dgrf.min-agricultura.pt/portal/prevencao-a-incendios-dfci/informacoes/cartografia/mapas-de-areas-ardidas>)

Por outro lado, a Comissão Nacional de Coordenação do Plano de Acção Nacional de Combate à Desertificação (CNC / PANCD), apela à necessidade de reduzir e contrariar as causas e os efeitos da desertificação (com perda de solo e erosão), em especial nos anos com níveis de precipitação anormalmente baixos onde a escassez de água e as elevadas temperaturas podem agravar o risco de incêndios.

Portugal foi identificado como o país do Sul da Europa com piores recursos em solo (58% da SAU pobre em matéria orgânica) e com elevado risco de erosão (69% do território). Uma vez mais esta identificação deve-se, não só às características do solo e ao seu declive, mas também reflecte o regime de precipitação, com concentração da mesma num curto período do ano, e a rápida perda de matéria orgânica por mineralização, devido a temperaturas elevadas na época seca (PDR 2007-2013).

A Fig. 43 apresenta uma classificação do índice de susceptibilidade à desertificação obtida em PDR 2007-2013.



Fonte: GPPAA a partir de "Corine soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community, CEE 1992

Fig. 43 - Susceptibilidade à desertificação (extraído de PDR 2007-2013)

A Cartografia de Risco de Incêndio Florestal (CRIF) é um projecto da responsabilidade do Instituto Geográfico Português, em conjunto com Autoridade Nacional de Protecção Civil e a Direcção-Geral dos Recursos Florestais. O objectivo desta Carta é, de acordo com <http://scrif.igeo.pt/cartografiacrif/2007/metodologia.html>, apoiar o planeamento de

medidas de prevenção aos fogos florestais, assim como a optimização dos recursos e infra-estruturas disponíveis para a defesa e combate aos fogos florestais.

A carta apresentada na Fig. 44 foi produzida através da atribuição de uma ponderação a cada critério considerado como relevante para a determinação da variabilidade espacial do risco de incêndio: ocupação do solo, declives, rede viária (aqui inclui-se linhas de alta/média tensão e rede ferroviária), exposição ao sol e densidade populacional.

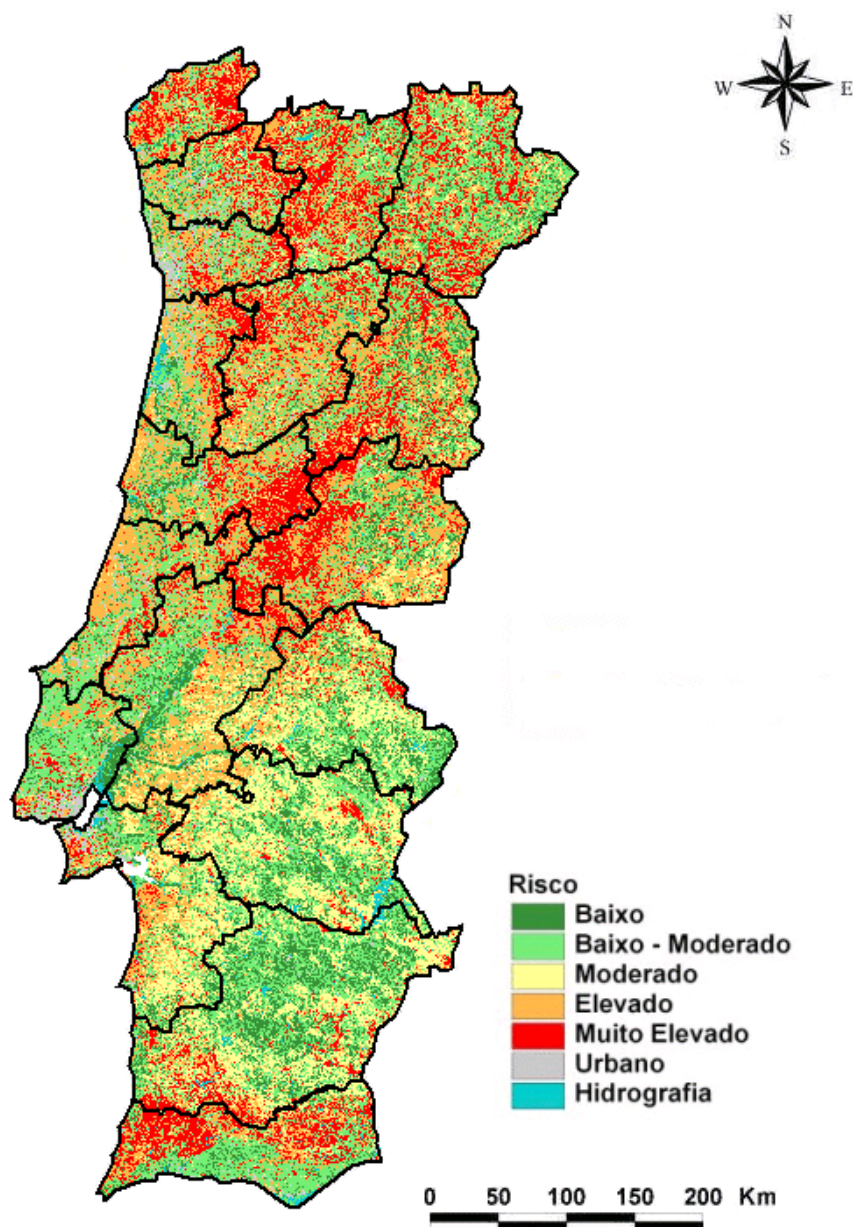


Fig. 44 - Carta de Risco de Incêndio Florestal em 2008 (extraída de <http://mapas.igeo.pt/>)

Esta carta é complementar à Carta de Risco Conjuntural de Incêndio Florestal (CRCIF) produzida anualmente pelo Instituto Superior de Agronomia (ISA) para a Direcção-Geral de Recursos Florestais que indica as zonas que se encontram em maior risco de arder



em cada ano. Esta carta é realizada com base nas áreas aridas nas últimas duas décadas, na taxa de crescimento da biomassa desde os fogos mais recentes e no estado da vegetação no final do mês de Maio (*i.e.*, se a vegetação se encontra mais seca ou mais húmida).

O Instituto de Meteorologia (IM) também desenvolve Cartografia de Risco de Incêndio que aborda a probabilidade de ocorrência de um fogo no próprio dia e nos dias seguintes. O IM encontra-se a desenvolver o Índice de Risco de Incêndio (FWI – *Fire Weather Index*) que agrega diferentes componentes, onde se incluem por exemplo o índice de combustível disponível e o índice de seca.

### **8.3 Poluição e potenciais efeitos na qualidade das águas subterrâneas**

#### **8.3.1 Considerações gerais**

Os fogos têm como consequência directa a redução, ou mesmo o desaparecimento, da biomassa florestal cujos efeitos se fazem sentir na diminuição da capacidade de retenção de água pelos solos e de infiltração, expondo-os à erosão e provocando o arrastamento de matéria fina, nomeadamente das próprias cinzas do fogo, para as linhas de água mais próximas ou a sua infiltração no solo.

Além dos processos físicos de erosão referidos, os fogos florestais também induzem importantes alterações ao nível da qualidade dos solos e das águas, sendo um dos principais processos associados o efeito da queima no ciclo dos nutrientes.

Os dados quantitativos sobre o impacto do fogo nos ciclos bioquímicos são escassos na zona Mediterrânica, onde a literatura revela que não existem muitos trabalhos desenvolvidos que incluam este tema. Contudo, existem alguns estudos sobre a dinâmica do azoto associada ao fogo em massas de água (lagos), uma vez que este nutriente limita muitas vezes a produtividade primária em ecossistemas naturais como resultado de processos de eutrofização (EUFIRELAB, 2006).

Apresenta-se uma breve descrição dos domínios considerados mais importantes, repartindo-os em processos físicos e químicos.

#### **8.3.2 Aspectos físicos**

O aquecimento artificial originado pelos fogos florestais é responsável pela alteração de importantes características físico-químicas dos solos, cujos efeitos se fazem posteriormente sentir nas características das águas a jusante. Estas alterações devem-se à destruição da estrutura base dos solos que se repercute ao nível da diminuição da

capacidade de infiltração e do aumento da erosão dos solos.

A análise das reacções térmicas que ocorrem quando o solo aquece pode ser efectuada através de uma Análise Térmica Diferencial (DTA). Esta ferramenta é extremamente útil na medida em que permite determinar a presença e o comportamento térmico de matérias-primas que se encontram no solo, como poluentes orgânicos específicos ou materiais hidrofóbicos. Em EUFIRELAB (2006) é caracterizada uma DTA típica de fogos florestais.

O quadro seguinte, retirado de *Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos – Relatório de Execução de Material 1* (cf. Lobo Ferreira et al., 2006), resume as reacções térmicas que ocorrem nos solos, em resultado do aumento da temperatura causado pelo fogo florestal.

Quadro 23 - Reacção térmica do solo ao aumento da temperatura (Moreno, 2004, in Lobo Ferreira *et al.*, 2006)

	Temperatura (°C)				
	0 – 170	170 - 220	220 - 460	460 - 700	700 - 900
<b>Reacção térmica do solo ao aumento de temperatura</b>	Pico endotérmico. Desidratação da amostra.	Pico endotérmico. Desidratação das formas de gel.	Pico exotérmico. Combustão da matéria orgânica. As reacções térmicas desencadeiam rearranjos e transformações das formas cristalinas do ferro e dos óxidos de alumínio as quais são muitas vezes mascaradas pelos intensos efeitos exotérmicos derivados da combustão da MO.	Pico endotérmico. Perda dos grupos OH das argilas.	Pico endotérmico. Decomposição dos carbonatos.
<b>Efeito do aumento da temperatura nos parâmetros físicos do solo</b>	Efeito negligível nos limites plástico e líquido do solo.	Nota-se um pequeno decréscimo dos limites plástico e líquido.		O solo absorve água mas não ocorre na forma plástica.	
	Pequeno efeito na distribuição das partículas.	A fracção de areia aumenta nitidamente enquanto a fracção argilosa e de silte decresce. Estas transformações são mais pronunciadas nos solos com teores elevados de argila e são atribuídas à fusão das partículas de argila e à calcinação das partículas de areia nas quais o ferro e os aluminossilicatos estão envolvidos. O <b>índice de estabilidade da água dos agregados</b> mostra um aumento contínuo depois de todas as reacções térmicas e também depois da combustão da matéria orgânica, geralmente considerado o mais importante agente cimentante. O aumento mais pronunciado ocorre entre 220 – 460 °C, quando a transformação térmica do ferro e do alumínio ocorre. Considera-se que a reorganização interna e a recristalização do ferro e dos óxidos de alumínio contribuem para o aumento da resistência dos agregados do solo, particularmente quando ocorre a combustão da MO, sugere que durante o processo de aquecimento, o solo adquire uma espécie de <b>laterização</b> . O aumento da temperatura provoca diferentes modificações na <b>porosidade</b> . Nos solos argilosos a porosidade aumenta continuamente até aos 460 °C, depois deste ponto a porosidade decresce como consequência da perda dos grupos OH das argilas e da ruptura dos carbonatos. Nos solos arenosos, a porosidade decresce continuamente com mais evidência entre os 170 – 220 °C.			
<b>Efeito do aumento da temperatura nos parâmetros químicos do solo</b>	Diminuição do <b>pH</b> - atribuído à oxidação de certos elementos, à exposição de novas superfícies, à desidratação dos colóides.		Aumento do <b>pH</b> - atribuído à perda dos grupos OH das argilas e à formação de óxidos de alguns elementos derivados da ruptura dos carbonatos.		Aumento do <b>pH</b> 4 a 5 unidades.
	A <b>capacidade de troca catiónica (CTC)</b> diminui progressivamente com o aumento da temperatura. A agregação das partículas finas pelo aquecimento pode causar este decréscimo bem como a secagem das partículas coloidais a temperaturas mais baixas para além da combustão da MO. Com temperaturas mais elevadas, a CTC pode diminuir também devido à desidratação da estrutura mineral e ao colapso da malha.				
	Não ocorre qualquer efeito na <b>MO</b> .		Diminuição da <b>MO</b> .		A combustão da MO fica praticamente concluída.
	Diminuição do azoto total		Concentração muito baixa de azoto total.		
	Aumento do <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> -N</b> devido à mineralização das formas orgânicas <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b> contidas nos complexos do solo.		Concentração muito baixa de <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> -N</b> .		Poucos vestígios de <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> -N</b> .
			Devido a fixação e volatilização.		
	O aumento da temperatura promove a mineralização do <b>P</b> orgânico e um contínuo decréscimo dessas formas acompanhado pelo aumento equivalente de formas inorgânicas. Depois dos 460 °C a forma orgânica é praticamente destruída e o fósforo encontra-se presente apenas na forma inorgânica. O aumento do Fósforo Disponível aumenta significativamente até aos 460 °C a partir da qual decresce. Tal facto sugere que o P disponível tem origem no processo de mineralização do fósforo orgânico.				

O aumento do calor tem um efeito negligenciável nas propriedades plásticas e líquidas do solo até aos 170 °C, notando-se um pequeno decréscimo aos 220°C. Depois dos 460°C e manifestamente a temperaturas superiores a 700°C, o solo absorve maiores quantidades de água e há combustão da matéria orgânica, o que resulta na perda de plasticidade e elasticidade do solo.

O efeito da temperatura produz diferentes modificações na porosidade dos solos consoante a sua constituição. Por exemplo, em solos com um teor inicial de argila maior, verifica-se que um aumento de temperatura até aos 170°C tem um efeito relativamente baixo na distribuição das partículas. Contudo, após os 220°C a fracção de areia aumenta bastante em relação ao teor em sedimentos e em argila, que diminuem, pelo que a porosidade aumenta de forma contínua até aos 460°C, diminuindo a partir daqui drasticamente, como consequência da perda dos grupos OH das argilas e da ruptura dos carbonatos. Em solos de textura arenosa, pelo contrário, a porosidade diminui continuamente e de forma mais evidente para o intervalo de temperatura entre os 170 – 220°C.

O índice de estabilidade da água no agregado do solo, considerado o agente mais importante que cimenta o solo, sofre uma diminuição contínua após as reacções térmicas, e também depois da combustão da matéria orgânica. A diferença mais pronunciada ocorre para temperaturas entre os 220 - 460°C, quando as transformações térmicas dos óxidos de ferro e alumínio ocorrem. Uma vez que a reorganização interna do solo e a recristalização dos óxidos de ferro e alumínio contribuem para aumentar a resistência interna dos agregados de solo, especialmente quando em simultâneo com a combustão da matéria orgânica, julga-se que durante o processo de aquecimento o solo sofra uma espécie de laterização. Apesar da estrutura do solo à superfície ser determinada por agregação, o grau de floculação ou dispersão da fracção de argila torna-se mais importante no subsolo.

Um outro aspecto de grande relevância na análise dos efeitos do aumento da temperatura causado pelos fogos é a sua cozedura e respectivas repercussões nas características de permeabilidade. Efectivamente, as camadas superficiais de solo florestal apresentam muitas vezes, após um incêndio, um abrandamento da capacidade de adsorção de água e, em alguns casos, são efectivamente repelentes à água.

O EUFIRELAB refere estudos que foram realizados a partir de observações de laboratório e de campo, onde se desenvolveram hipóteses no que respeita à formação das camadas hidrofóbicas, tanto superficiais como subsuperficiais. As elevadas temperatura à superfície geradas pelos fogos - podem atingir os 500°C, permanecendo relativamente elevadas durante um considerável período de tempo – têm como consequência a evaporação ou o consumo pelas chamas de uma parte dos constituintes hidrofóbicos da matéria orgânica do solo. Outra parte, por seu lado, torna-se ainda mais fluida, deslocando-se no sentido do gradiente de temperatura que se desenvolve ao longo do perfil do solo. Ao atingir um local onde as partículas do solo mais frias permitem a sua condensação, formam uma camada acumulada de substâncias hidrofóbicas. Assim, após o incêndio, pode estar presente uma camada repelente à água por baixo da superfície do solo e paralela a esta nas áreas ardidas.

A presença de químicos orgânicos hidrofóbicos deriva da decomposição de detritos

orgânicos que, no solo, se podem misturar com as partículas minerais, obstruir os espaços intersticiais e formar uma camada superficial que é relativamente impermeável à água. Esta situação é particularmente prejudicial para a erosão do solo, em especial em locais com declives acentuados. Na realidade, esta estratificação induzida pelo fogo permite que a água da chuva se infiltre apenas até uma certa profundidade, antes da frente molhada atingir a camada repelente à água.

Quando a infiltração da água é impedida ou abrandada temporariamente, a superfície de solo torna-se saturada. Então, a água flui lateralmente, gerando a escorrência superficial que constitui a força que promove a erosão do solo, arrastando partículas da camada superficial do solo e alguma porção da camada hidrofóbica inferior. Este mecanismo explica a erosão em ravinas e a formação de pequenos ribeiros, comumente encontrados em solos queimados.

Bitner *et al.* (2001) apresentam um levantamento mais exaustivo de informação relativa às alterações nos parâmetros físicos da água e solos que ocorrem depois de um fogo florestal.

### **8.3.3 Aspectos químicos**

#### **8.3.3.1 Alterações gerais nas cinzas**

As cinzas são o material residual da combustão que permanece após o fogo florestal. A quantidade de cinzas depositadas depende do peso e da distribuição espacial da vegetação queimada, do seu grau de combustão e do subsequente transporte de resíduos.

As propriedades das cinzas dependem das condições de queima. Quando a combustão é completa, as cinzas apresentam uma cor branca-acinzentada com uma composição praticamente mineral. Esta cinza é constituída pela componente inorgânica da madeira que permanece após a queima. Contudo, poucos são os fogos naturais que atingem temperaturas suficientemente elevadas e durante o período de tempo necessário para uma combustão completa. Assim, a maioria das cinzas produzidas em fogos florestais apresentam uma cor cinzenta ou preta, uma vez que ainda contêm matéria orgânica residual (30 - 90% do peso) e carvão vegetal resultantes da combustão incompleta (EUFIRELAB, 2006 e Ranalli, 2004).

A composição química das cinzas depende da própria composição do material vegetal que é queimado. Este tópico tem sido amplamente investigado, designadamente através da queima em laboratório, embora algumas das cinzas analisadas nestas condições provavelmente apresentem maior conteúdo mineral do que o resultante da queima no campo. Lopes (2006) apresenta os resultados da caracterização de solos e cinzas de incêndios para diversos cobertos vegetais em Portugal.

Os dados referidos na literatura mostram que existe uma grande variabilidade na composição das cinzas, dependendo da sua fonte de origem. O estudo da relação entre o tipo de vegetação e a composição das cinzas foi realizado por diversos autores que analisaram as cinzas através de difracção por raio X de três plantas diferentes (ulex, pinheiro e eucalipto).

De uma forma geral, os resíduos das cinzas vegetais são dominados por carbonatos de metais alcalinos e alcalino-terrosos, com quantidades variáveis de sílica, sesquióxidos (óxidos em que dois átomos de um elemento estão combinados com três átomos de oxigénio) de metais alcalinos e alcalino-terrosos, polifosfatos de cálcio e magnésio, e pequenas quantidades de azoto orgânico e inorgânico. As concentrações relativas destes componentes variam de acordo com a espécie de planta. Desta forma, podem-se encontrar variações no teor em azoto entre 0,03 e 1,5%, fósforo entre 0,03 e 3,0%, potássio entre 0,3 e 20%, cálcio entre 2,5 a 25% e magnésio entre 1,5 a 15% (EUFIRELAB, 2006).

O azoto e o fósforo podem encontrar-se sob a forma de compostos orgânicos ou inorgânicos. O azoto inorgânico presente nos lixiviados da cinza existe em concentrações muito baixas, sendo uma grande parte das formas inorgânicas volatilizada. O azoto nas cinzas encontra-se principalmente na sua forma orgânica de baixa solubilidade. A quantidade de fósforo inorgânico nos lixiviados das cinzas não excede os 3% da quantidade total de fósforo presente nas cinzas. A baixa solubilidade do fósforo nos lixiviados foi atribuída ao facto deste nutriente se encontrar principalmente nas formas pouco solúveis de polifosfato de cálcio e magnésio (Ranalli, 2004).

Tendo em conta estes aspectos, é possível considerar que as cinzas depositadas no solo após o incêndio melhoram a fertilidade do solo e facilitam o crescimento da vegetação.

### **8.3.3.2 Alterações gerais nos solos**

A composição química dos solos sofre alterações após um incêndio como resultado de alterações na própria estrutura dos solos e também pela lixiviação das cinzas através do solo.

Este processo leva a diversas alterações de que se começa por destacar a hidrólise dos catiões básicos das cinzas, assim como a formação de um resíduo alcalino, que pode ter um pH superior a 12 e conduzir a um aumento do pH do solo. A extensão do aumento do pH do solo depende da sua capacidade reguladora, que pode diminuir devido ao aquecimento provocado pelo fogo.

Foi já estudado o efeito de solubilização das soluções alcalinas na matéria orgânica, e que esta promove a agregação do solo, através da incorporação das partículas minerais

presentes. Por outro lado, os lixiviados das cinzas trazem para o solo uma elevada densidade de cargas eléctricas que podem favorecer a floculação das argilas dispersas. A adição dos lixiviados de cinza no solo pode, por conseguinte, influenciar o potencial de erodibilidade dos solos que diminui devido à floculação e acelera devido à dispersão.

Além dessa componente, os parâmetros químicos do solo também são afectados pelo aumento da temperatura provocado pelo fogo florestal.

O aquecimento aos 220°C causa uma diminuição do pH do solo que volta a aumentar até ao valor inicial quando a temperatura ronda os 460°C. A temperaturas mais elevadas, da ordem dos 700°C a 900°C, o pH aumenta entre 4 a 5 unidades. As causas da diminuição inicial podem ser atribuídas à oxidação de alguns elementos ou à desidratação de colóides e consequente diminuição da sua acção reguladora. O forte aumento do pH que ocorre a temperaturas mais elevadas, pode ser devido à perda dos grupos OH das argilas e à formação de óxidos de vários elementos, obtidos a partir da ruptura dos carbonatos (EUFIRELAB, 2006).

A capacidade de troca catiónica (CTC) diminui progressivamente com o aumento da temperatura. A agregação das partículas mais finas, resultado da acção do calor, pode causar esta diminuição, apesar de não ser este o único factor a considerar. A simples secagem das partículas coloidais pode também ter influência, assim como a combustão da matéria orgânica. Por outro lado, a temperaturas mais elevadas, a desidratação dos minerais cristalinos e consequente desagregação da sua estrutura podem também contribuir para a redução da CTC.

O efeito do calor no conteúdo em matéria orgânica dos solos está bem definido para todos os tipos de solo. Não existem efeitos detectáveis até aos 170°C, ocorrendo uma pequena diminuição aos 220°C, enquanto que aos 460°C a combustão está praticamente concluída.

O azoto total apresenta um comportamento semelhante ao da matéria orgânica. Até aos 220°C ocorre uma pequena diminuição da sua concentração, ao passo que a diminuição mais acentuada acontece em simultâneo com a combustão da matéria orgânica: após esta combustão o conteúdo de azoto total é muito baixo.

O  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , pelo contrário, aumenta consideravelmente com a temperatura até aos 220°C, diminuindo de seguida até aos 460°C, não sendo praticamente detectado para temperaturas superiores. O aumento do  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  devido ao calor deve-se à mineralização dos compostos complexos de  $\text{NH}_4^+$  orgânico existentes no solo; a diminuição verificada a temperaturas mais elevadas é devido à fixação ou volatilização.

Com base nas referências bibliográficas analisadas no âmbito do EUFIRELAB, é possível verificar que existem diferenças na taxa de perda dos nutrientes por parte da biomassa

ardida. No caso do azoto, esta taxa é bastante elevada, uma vez que o N é facilmente volatilizado através do calor. Contudo, no caso do fósforo por exemplo, estas perdas são negligenciáveis.

O aquecimento promove a mineralização do fósforo orgânico e a diminuição contínua desta fracção, acompanhada por um aumento equivalente da forma inorgânica. Após os 460°C, a forma orgânica é completamente destruída e o fósforo presente encontra-se somente na forma inorgânica. A quantidade de fósforo disponível aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura até aos 460°C, seguida de uma diminuição acentuada, o que sugere que o fósforo disponível possa ter origem no processo de mineralização do fósforo orgânico.

Depois do incêndio, a quantidade de macronutrientes, como por exemplo o cálcio e o azoto, pode aumentar, como consequência da deposição de parte dos resíduos das cinzas. As quantidades de fósforo, potássio, cálcio e magnésio libertadas pelo fogo e que se acumulam na superfície do solo e nas cinzas são até dez vezes superiores em relação às quantidades totais e disponíveis desses elementos no solo.

Atendendo às temperaturas de volatilização de diversos elementos pode avaliar-se a sua propensão para serem volatilizados. O azoto volatiliza a temperaturas relativamente baixas (cerca de 200°C). A volatilização não é um processo dominante nem para o fósforo nem para os catiões, já que estes volatilizam a temperaturas elevadas: fósforo (770°C), cálcio (1240°C), magnésio (1107°C), potássio (760°C), e sódio (880°C) (Ranalli, 2004).

Apresenta-se em maior detalhe alguma informação sobre as alterações de qualidade registadas nos solos e nas águas de áreas ardidas.

### **8.3.3.3 Principais alterações de parâmetros físico-químicos**

A produção de cinzas e as alterações verificadas nos solos após um incêndio são reflectidas na qualidade das massas de água de jusante, tanto superficiais como subterrâneas, após eventos de precipitação.

As medições realizadas em amostras de água permitem verificar a concentração de diversos elementos é bastante mais elevada na primeira chuva que ocorre na área ardida após o fogo, em comparação com uma área não ardida. Contudo, esta situação não se mantém nos eventos de precipitação seguintes. A principal explicação para este facto prende-se com a pequena porção de matéria fina ou volátil que se manteve na vizinhança da área ardida.

Vários estudos demonstram que os diferentes elementos libertados devido à combustão



da matéria orgânica podem seguir diferentes percursos até atingir uma massa de água (Ranalli, 2004):

- volatilização seguida de difusão e dissolução do fumo numa massa de água, ou dissolução do fumo na precipitação;
- erosão das cinzas por acção do vento e da água proveniente de encostas e subsequente transporte até a uma massa de água;
- lixiviação da cinza presente à superfície do solo por infiltração até às águas subterrâneas.

Apresenta-se uma síntese dos resultados de diversos estudos onde a qualidade da água foi medida em estações de monitorização localizadas em afluentes das bacias aridas e não aridas, com o objectivo de medir as diferenças de concentração nos vários parâmetros de qualidade da água, a montante e a jusante.

Procurou-se resumir a informação recolhida no Quadro 24.

Quadro 24 - Síntese da informação sobre qualidade dos solos e das águas em áreas ardidas

Referência Bibliográfica	Meio	pH	CTC	Condutividade eléctrica	Carbono	Cálcio	Magnésio	Azoto	Potássio	Sódio	Fósforo
<i>In: Bitner et al. (2001):</i>											
Baird et al. (1999)	Solo				Diminui 10 a 30%; 280 a 640 kg/ha removidos por erosão superficial			Diminui			
Stromgaard (1992)	Solo	Aumenta			Aumenta	Diminui	Aumenta	Aumenta	Aumenta		
Beillas e Roda (1993)	Águas superficiais Águas de escorrência	Diminui				Aumenta		Aumenta		Diminui	
DeBano et al. (1979)	Solo Águas superficiais Águas de escorrência		Diminui			Aumenta 0,52 - 20,04 Kg/ha	Aumenta 0,07 - 3,63 kg/ha	Aumenta	Aumenta	Aumenta 0,1 - 2 kg/ha	
Tiedmann et al. (1978)	Águas superficiais Águas de escorrência Solo	Aumenta		Aumenta de 46 - 66 umhos/cm		Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta 2 a 3 x
Wright (1976)	Águas de escorrência	Aumenta				Aumenta			Aumenta 265%	Não registou alterações	Aumenta 93%
Raison et al. (1985)	Cinzas					Aumenta 10 a 50 x	Aumenta 10 a 35 x				Aumenta
Austin e Baisinger (1955)	Solo	Aumenta 2 a 4 unidades				Aumenta 830%	Aumenta 337%	Diminui	Aumenta 166%		
Viro (1974)	Solo Cinzas	Aumenta				Aumenta 3 x Aumenta	Aumenta 2 x	Aumenta	Diminui		Aumenta
Stednick et al. (1982)	Águas superficiais						Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta de 0,018 - 0,026 mg/l
Schindler et al. (1980)	Águas superficiais							Aumenta 2 x	Aumenta 1,4 a 2,9 x		Aumenta 1,4 a 3,2 x
Chambers e Attiwill (1994)	Solo							Aumenta			
Adams et al. (1994)	Solo				Diminui			Diminui			
Beschta (1900)	Águas superficiais								Aumenta até 4,4 mg/l		Ligeiro aumento

Referência Bibliográfica	Meio	pH	CTC	Condutividade eléctrica	Carbono	Cálcio	Magnésio	Azoto	Potássio	Sódio	Fósforo
<i>In: Ranalli (2004)</i>											
Soto e Diaz-Fierros (1993)	Liviado de cinzas	7,3 - 9,6									
Kutieli e Inbar (1993)	Solo			Aumenta							
Laranjeira e Leitão (2008)	Águas subterrâneas Águas superficiais Solo	Aumenta Aumenta		Aumenta						Aumenta Aumenta	Aumenta Aumenta

Referência Bibliográfica	Meio	Enxofre	Manganês	Cobre	Zinco	Césio	Iodo	Cloro	HAPs
<i>In: Bitner et al. (2001)</i>									
Belillas e Roda (1993)	Águas superficiais Águas de escorrência	Ligeiro aumento Aumento (sem significado estatístico)							
DeBano et al. (1979)	Solo	Aumenta							
Tiedmann et al. (1978)	Solo		Aumenta						
Chambers e Attwill (1994)	Solo		Aumenta 279%						
Auclair (1977)	Solo			Mobilizado pela queima	Mobilizado pela queima				
Paliouris et al. (1995)	Solo					Diminui			
Amiro et al. (1996)	Cinzas					10 a 90% mantém-se nas cinzas, dependendo da vegetação ardida	Aumenta até os 400°C, mas decresce em fogos cujas temperaturas sejam da ordem dos 1000°C	24% nas cinzas à temperatura de 400°C	
Laranjeira e Leitão (2008)	Águas subterrâneas Águas superficiais Solo		7810 µg/l após o incêndio, baixando passados 5 dias para 14						Presença de acenafteno e naftaleno  10 dos 16 HAP's considerados prioritários pela US EPA

## pH

Relativamente ao comportamento do pH no solo e na água após um fogo florestal, a maioria dos trabalhos realizados apontam como conclusão geral um aumento do seu valor em ambos os meios citados. Não obstante, trabalhos desenvolvidos pelo *National Wildfire Coordinating Group* concluem que raramente os solos áridos ou semiáridos, tipicamente alcalinos, sofrem um aumento do pH após o fogo. Aqueles que são neutros, podem sofrer um ligeiro aumento de pH, mas retornam aos valores originais num período de um a dois anos após o fogo (Bitner *et al.*, 2001).

Verifica-se que o pH das lamas que contêm cinzas em zonas florestais pode exceder o valor 12 (Plumlee *et al.*, 2007). No lixiviado das cinzas de ulex, pinheiro e eucalipto registaram-se variações de pH de 7,3 a 9,6, o que é atribuído à presença de compostos alcalinos, principalmente carbonato de cálcio, óxido de magnésio, óxido de cálcio, hidróxido de magnésio e carbonato de magnésio.

Existem outros estudos que referem um aumento do pH mais acentuado, da ordem das 2 a 4 unidades em solos queimados. Esta foi uma das conclusões de Austin e Baisinger (1955, in Bitner *et al.*, 2001) que, ao observar a camada superficial do solo após um incêndio, atestaram a sua alcalinidade ao medir um pH de 7,6. Este valor é mais elevado que o da bacia de controlo, onde se registou um valor de 4,5. Passados dois anos, o pH ainda não tinha atingido os valores antes do incêndio, situando-se nos 5,7. Bitner *et al.* (2001) ao estudar um solo ardido na Zâmbia notou que o pH regressou aos valores registados antes do incêndio cinco anos após a sua ocorrência.

No subsolo as alterações não se fazem sentir de forma tão evidente como na camada superficial, apesar de se terem encontrado ligeiras diferenças. Viro (1974, in Bitner *et al.*, 2001) concluiu que o pH médio de uma área ardida era 0,4 unidades mais baixo quando comparado com uma área não ardida, decorridos 20 anos do incêndio. O autor notou também que persistiu uma diferença no pH de 0,2 unidades, durante 50 anos (Bitner *et al.*, 2001).

Na água, este parâmetro caracteriza a sua acidez, neutralidade ou alcalinidade, e está estritamente ligado à solubilidade dos metais, com consequências significativas em termos de risco de poluição. Laranjeira e Leitão (2008) observaram um aumento nos valores de pH nas águas subterrâneas analisadas em bacias ardidas da região Centro de Portugal. As autoras ressaltam que as características naturais das águas subterrâneas – em que o pH resultante deve ser ligeiramente ácido, por se tratar de aquíferos desenvolvidos sobre solos ácidos, quartizíticos, graníticos e xistosos – predominam. Os valores de pH mais elevados foram registados na bacia ardida, resultado da influência do fogo e da presença de cinzas na água.

Belilas e Roda (1993, in Bitner *et al.*, 2001) detectaram uma pequena diminuição do pH (0,2 unidades) durante 2 anos após o fogo florestal no curso de água analisado em Espanha.

Outros autores descrevem ter observado um ligeiro aumento do pH em águas de escorrência provenientes de encostas com declives tanto moderado como acentuado (Bitner *et al.*, 2001). Também Laranjeira e Leitão (2008) concluem sobre o aumento do pH em águas superficiais de bacias ardidas.

### Condutividade eléctrica

A condutividade eléctrica dos solos e da água traduz a presença de iões dissolvidos. Quanto maior for a quantidade de iões dissolvidos, maior será a condutividade eléctrica da água. Em águas interiores, os iões directamente responsáveis pelos valores da condutividade são, entre outros, o cálcio, o magnésio, o potássio, o sódio, os carbonatos, os sulfatos e os cloretos.

No que respeita ao solo, trabalhos desenvolvidos sobre este tema reportam que a condutividade eléctrica é significativamente mais elevada num solo queimado quando comparada com um solo não ardido. Este aumento pode ser atribuído à combustão das plantas que liberta iões solúveis (Ranalli, 2004). Nos estudos conduzidos por aquele autor, os valores elevados mantiveram-se por um período de oito meses após o fogo.

No que concerne às águas subterrâneas, Laranjeira e Leitão (2008) observaram um aumento dos valores da condutividade, de forma ténue e prolongada no tempo, o que é justificado pela lentidão dos processos de migração de sais em profundidade e pela retenção de elementos no solo atravessado.

Verifica-se um aumento da condutividade eléctrica em linhas de água das bacias ardidas, um curto período de tempo depois do fogo. Alguns autores atribuem este facto às cinzas que caem sobre os cursos de água (Bitner *et al.*, 2001). Laranjeira e Leitão (2008) atribuem o aumento deste parâmetro à mineralização da água, mais elevada em áreas recentemente ardidas.

### Capacidade de troca catiónica

A capacidade de troca catiónica traduz a capacidade de retenção de nutrientes por troca e, assim, o poder tampão do solo. Esta capacidade varia com o teor e a natureza dos materiais finos presentes na argila e também com o teor de substâncias húmicas. Os colóides são partículas com superfície específica muito elevada carregador electricamente, o que lhes permite atrair, reter e trocar elementos que apresentem cargas eléctricas opostas. A argila e o húmus são principalmente de natureza negativa (aniónica) pelo que os iões retidos ou trocados são predominantemente catiões, na maioria dos casos, nutrientes minerais para as plantas, como o cálcio, o magnésio e o potássio.

Foi observado que a capacidade de troca catiónica em solos queimados diminui, mantendo-se relativamente baixa durante pelo menos um ano após o fogo, uma vez que as ligações disponíveis na matéria orgânica são destruídas pelo fogo (Bitner *et al.*, 2001).

A maioria da informação disponível sobre o comportamento dos nutrientes nas águas de escorrência e nos solos que contribuem para a sua formação, diz respeito aos nutrientes fundamentais para as plantas (Bitner *et al.*, 2001).

### Carbono

A principal origem deste elemento está na queima da biomassa que ocorre durante o incêndio. As conclusões encontradas na bibliografia consultada não são unânimes quanto ao seu comportamento. Adams *et al.* (1994) e Baird *et al.* (1999) (in Bitner *et al.*, 2001) concluem que a quantidade de carbono em solos ardidos diminui, facto que os autores atribuem à remoção de carbono por erosão superficial. Os autores notam que esta situação pode ter resultado no aumento da quantidade de carbono verificada nas águas de escorrência. Stromgaard (1992, in Bitner *et al.*, 2001) chegou a um resultado distinto dos anteriores, já que aponta para um ligeiro aumento do teor de carbono no solo. Contudo, ambos os estudos observam que as alterações no conteúdo de carbono no solo se limitam aos primeiros horizontes do solo.

Experiências laboratoriais realizadas por Raison & McGarity (1980) mostram que o carbono orgânico numa amostra de solo, de tipo podzol, foi dissolvido pelo lixiviado de uma cinza adicionada à amostra. A dissolução do carbono orgânico no solo foi atribuída ao elevado pH do lixiviado da cinza. A um pH elevado os grupos funcionais ácidos do carbono orgânico são ionizados, o que torna os compostos de carbono orgânico mais solúveis em água (Ranalli, 2004).

### Cálcio

O cálcio é o elemento químico mais abundante na maioria das águas e das rochas do planeta. Os sais de cálcio possuem solubilidade moderada a elevada, sendo muito comum a sua precipitação sob a forma de carbonato de cálcio.

O trabalho de Raison *et al.* (1985) aponta para um elevado valor de cálcio nas cinzas de áreas ardidas por fogos florestais. Estas, em conjunto com a libertação deste elemento pela camada superficial do solo, constituem as principais fontes de cálcio após um incêndio (Bitner *et al.*, 2001).

Nas cinzas, o cálcio ocorre maioritariamente nas formas de óxido e de carbonato. Os óxidos são solúveis em água, convertendo-se rapidamente em formas carbonatadas que são solúveis somente sob condições ácidas. Nas águas subterrâneas os teores de cálcio variam, geralmente, entre 10 e 250 mg/l.

Os trabalhos desenvolvidos por Austin & Baisinger (1955) e por Viro (1974) (cf. Bitner *et al.*, 2001) referem um aumento da quantidade de cálcio à superfície do solo em área ardida, face à

área de controlo não ardida. Após dois anos, a quantidade de cálcio presente no solo ardido era ainda bastante superior ao valor de controlo. Os mesmos autores acrescentam ainda que, no seu caso de estudo, o cálcio sofreu um processo de lixiviação bastante lento, só tendo voltado aos níveis de controlo 50 anos depois do incêndio. Bitner *et al.* (2001), por seu lado, observou uma ligeira diminuição na quantidade expectável de cálcio na camada superficial de solo, imediatamente após o incêndio. Em horizontes mais profundos, ocorreu um aumento imediato da quantidade de cálcio, provavelmente como resultado do calor e não tanto devido à lixiviação das cinzas. A concentração de cálcio diminuiu ao longo do tempo, mas cinco anos depois do fogo ainda apresentava valores mais elevados que os de controlo.

Quanto ao comportamento do cálcio nas águas superficiais, os resultados são unânimes e apontam para um aumento da quantidade de cálcio. Belillas e Roda (1993) verificaram um aumento da quantidade deste nutriente em águas de escorrência proveniente de zonas declivosas ardidas, face às não ardidas, aumento esse que se fez sentir durante um ano após o incêndio. Contudo, Tiedemann *et al.* (1978 in Bitner *et al.*, 2001) notaram que, depois de eventos subsequentes de precipitação, a concentração de cálcio diminuiu devido à sua diluição num grande volume de água.

### Magnésio

O magnésio é um elemento químico que apresenta propriedades muito semelhantes às do cálcio sendo, no entanto, mais solúvel e portanto mais difícil de precipitar.

Nas cinzas resultantes de um fogo florestal, o comportamento do magnésio é semelhante ao do cálcio. A literatura consultada sobre a presença de magnésio no solo aponta para a conclusão geral de que a concentração do nutriente aumenta depois do incêndio, retornando aos valores registados antes do fogo num período de tempo entre os dois e os seis anos (Bitner *et al.*, 2001). Viro (1974, in Bitner *et al.*, 200) encontrou quantidades apreciáveis de magnésio no subsolo, à profundidade de 30 cm em solo mineral, concluindo assim que este nutriente é facilmente lixiviado para o subsolo.

Quanto às linhas de água superficiais, verifica-se que a quantidade de magnésio aumenta depois do fogo florestal. Bitner *et al.* (2001) referem que este aumento é imediato, mas que em eventos subsequentes de maior caudal a concentração de magnésio diminuiu, resultado do efeito de diluição.

### Azoto

O nitrato e a amónia são as formas de azoto com maior referência na literatura sobre efeitos de fogos florestais no meio ambiente.

Os resultados relativos ao teor de azoto nos solos são variados, e por vezes contraditórios, na

medida em que a libertação de azoto é função da intensidade e da duração do fogo (cf. Secção 8.3.3.2) e que a sua concentração no solo e nas águas depende de uma série de factores que se prendem com as características da própria bacia (Ranalli, 2004).

Assim, alguns autores atestam um aumento do azoto em solos queimados, enquanto que outros referem um aumento na quantidade de amónia. Contudo, existem ainda resultados que apontam para uma diminuição da quantidade de azoto no solo.

As justificações apresentadas para a diminuição de azoto baseiam-se na sua volatilização durante fogos de maior intensidade, verificando-se, pelo contrário, um grande aumento na quantidade de amónia nas cinzas e nos solos subjacentes após fogos de menor intensidade. Efectivamente, a volatilização do azoto a partir de solos superficiais ricos em matéria orgânica pode ocorrer quando a temperatura excede os 200°C e o aquecimento do solo resulta na libertação imediata de quantidades significativas de amónia devido à oxidação da matéria orgânica. Devido ao calor, a amónia é libertada ficando retida no solo em forma permutável. A quantidade libertada aumenta com o aumento da quantidade total de azoto no solo, assim como com temperaturas até aos 400°C (Ranalli, 2004).

Há, porém, características da bacia que podem inibir os processos de nitrificação, acabando este por ocorrer somente após o fogo. Por exemplo, numa floresta densa e bem desenvolvida de pinheiros, também com uma densa camada de agulhas, há uma inibição da mineralização e da nitrificação do azoto, devido à presença de compostos orgânicos, como os terpenos (encontram-se em sementes, flores, folhas, raízes e madeira de plantas superiores assim como no musgo, algas e líquenes). Estes compostos são removidos ou inactivados por acção do fogo (Ranalli, 2004).

Todos os factores referidos interferem na magnitude da diferença entre os valores de azoto pré e pós-fogo, bem no intervalo de tempo durante o qual a concentração se mantém mais elevada. O aumento do azoto é, ainda, atribuído à diminuição das necessidades deste nutriente por parte da vegetação. O aumento do azoto orgânico também atribuído aos detritos orgânicos presentes nas linhas de água (Bitner *et al.*, 2001).

Relativamente à presença de água, estudos de monitorização da qualidade da água abrangendo períodos mais longos apontam para uma tendência no comportamento do azoto ao longo do tempo, durante e depois de um fogo florestal. Esta tendência consiste num aumento da concentração de azoto nas massas de água, tanto na forma de nitrato como de amónia, durante eventos de precipitação registados nos meses seguintes ao fogo, com um aumento da média mensal até atingir um pico, geralmente um ano a dois depois do fogo. De seguida, verifica-se um lento decréscimo na concentração de nitrato (Ranalli, 2004).

Contudo, como já foi referido, nem todos os trabalhos desenvolvidos relativamente a este tópico apontam para a mesma conclusão. Há autores que, ao estudar os efeitos de queimas



controladas dentro de bacias hidrográficas experimentais concluíram que estes não produzem nenhum tipo de alteração detectável na composição química das linhas de água. As razões apontadas são as seguintes (Ranalli, 2004):

- ◆ as queimas controladas consomem menos de um terço da massa de solo florestal, composta por agulhas de pinheiro, e com baixo teor de cinzas. Como tal, a quantidade dos elementos libertados a partir das cinzas é pequena;
- ◆ as soluções contendo elementos solúveis em água e partículas de cinza em suspensão são filtradas pela vegetação não queimada e pelas camadas do solo, antes de atingir as linhas de água;
- ◆ as faixas não queimadas adjacentes às linhas de água funcionam como tampão, promovendo uma filtração adicional.

### Potássio

Sendo um constituinte indispensável ao correcto desenvolvimento das plantas, o potássio encontra-se em quase todo o tipo de solos, em diversas formas e com diferentes graus de solubilidade. O ião potássio é absorvido pelo solo através dos compostos do húmus, ou por intermédio de argilas ou zeolites (grupo de minerais aluminossilicatos hidratados de sódio, potássio, cálcio e bário) naturais. É um metal alcalino que ocorre em pequenas quantidades ou está ausente nas águas subterrâneas, devido à sua participação intensa em processos de troca iónica, além da facilidade de ser adsorvido pelos minerais de argila e dos seus sais serem bastante utilizados pela matéria vegetal (Bitner *et al.*, 2001).

Nas cinzas "frescas" o potássio encontra-se na forma de óxido ou carbonato, embora a conversão de óxido a carbonato ocorra rapidamente. Todos os compostos de potássio formados devido ao processo de combustão são solúveis em água. Verifica-se também que este elemento sofre lixiviação em solos minerais, tendo sido encontrado à profundidade de 30 cm (Bitner *et al.*, 2001).

Em relação ao solo, verifica-se um aumento da concentração de potássio após um fogo, que pode prevalecer por pequenos curtos períodos de tempo como 40 dias (segundo Stroomgaard, 1992) ou manter-se por períodos mais longos. Aliás, o estudo de Austin & Baisinger (1955, in Bitner *et al.*, 2001), aponta para esta última situação já que, decorridos dois anos do incêndio, o teor de potássio nos solos não tinha ainda regressado ao valor inicial. Stroomgaard (1992) atribui o aumento de potássio no solo à quantidade de nutrientes libertada pelas cinzas.

Quanto aos recursos hídricos superficiais, as conclusões presentes na bibliografia consultada apontam para um aumento do teor de potássio em linhas de água. Tiedemann *et al.* (1978 in Bitner *et al.*, 2001) constataram que um aumento de caudal no curso de água analisado fez diminuir a concentração de potássio, resultado do efeito de diluição. Contudo, passados 3 anos, um novo aumento do caudal levou a novo aumento na concentração de potássio

possivelmente como resultado de nova lixiviação ou erosão do solo.

### Sódio

O sódio pertence ao grupo dos metais alcalinos e desempenha um papel fundamental no metabolismo celular.

Os efeitos do fogo sobre a concentração deste nutriente nas águas superficiais são bastante diversificados. Alguns autores notaram um aumento imediato de sódio num curso de água, valor que diminuiu em eventos subsequentes de aumento de caudal por efeito de diluição e outros referem que a quantidade de sódio permaneceu baixa em águas de escorrência (Bitner *et al.*, 2001).

Laranjeira e Leitão (2008) apresentam alguns resultados de um projecto FCT em curso "Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos" onde se efectua a análise do impacte dos fogos florestais na qualidade química das águas superficiais e subterrâneas, bem como dos solos, para quatro pequenas bacias (Caratão, Carvoeiro, Quebrada e Penhascoso) integrando áreas não ardidas recentemente, áreas ardidas recentemente e áreas não ardidas. Constaram não ser claro qualquer padrão de evolução após o período de incêndio, pelo que atribuição da causa do aumento da quantidade de sódio a um incêndio não é linear, embora se possa estar na presença de um parâmetro cujo efeito se faz sentir por diversos meses. De qualquer forma, aquelas autoras referem a presença de teores mais elevados na área mais recentemente ardida analisada do Penhascoso (cf. Fig. 45).

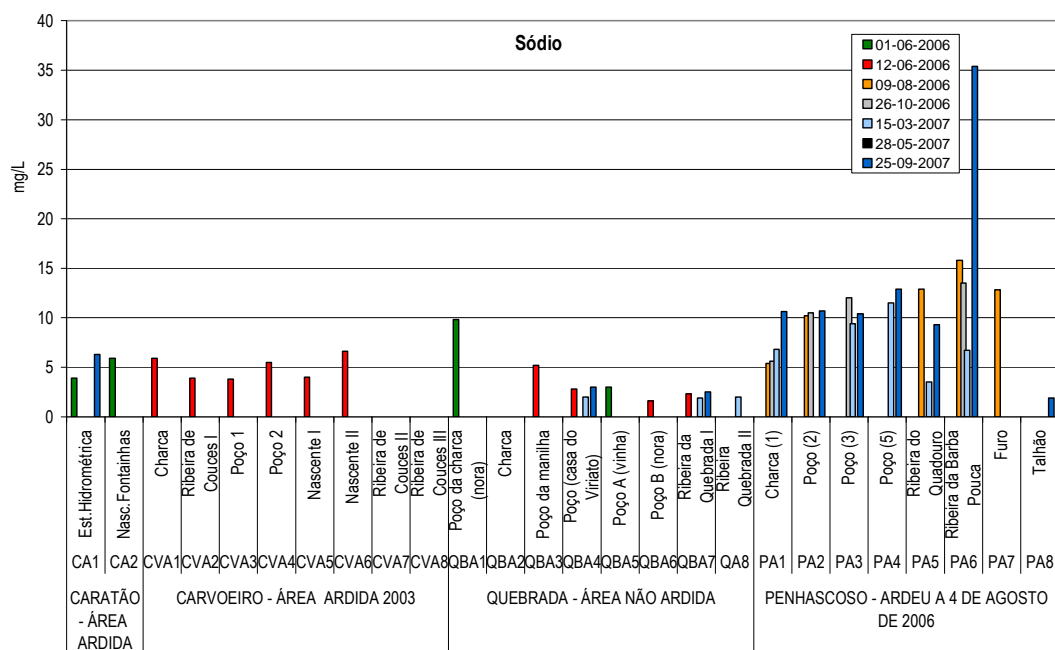


Fig. 45 - Valores de concentração em sódio nos quatro locais de estudo (Laranjeira e Leitão, 2008)

### Fósforo

O fósforo é um elemento de vital importância no crescimento e saúde de plantas e animais. Raison *et al.* (1985) e Viro *et al.* (1974) (in Bitner *et al.*, 2001) reportam que a concentração de fósforo nas cinzas aumenta após o fogo florestal.

O calor e a presença de fósforo nas cinzas geralmente aumentam a quantidade expectável de fósforo nos solos superficiais após o fogo. Trabalhos desenvolvidos por diversos autores atribuem o aumento da concentração do nutriente à redução nos depósitos biológico e geoquímico (como, por exemplo, a redução na fixação e precipitação do fósforo) para as formas solúvel e inorgânica.

A maior quantidade de fósforo encontra-se restrita à camada superficial do solo na medida em que grande parte deste nutriente está na forma de polifosfatos de cálcio, composto que apresenta uma baixa solubilidade na água, pelo que a sua lixiviação pode ser limitada. A solubilidade do fósforo pode aumentar se a cinza se incorporar no solo, com a resultante neutralização da alcalinidade da cinza. A longo prazo, a redução no alumínio permutável, o aumento da sílica solúvel e as taxas mais elevadas de decomposição da matéria orgânica que ocorrem depois do fogo, em alguns solos, podem também elevar a disponibilidade do fósforo. Contudo, em solos com altos teores de sesquióxidos, e por isso com grande capacidade de fixação de fósforo, pouca quantidade mobilizada deste nutriente pode persistir numa forma extraível (Ranalli, 2004).

A presença de fósforo nas águas de jusante, após um fogo florestal, tem sido apontada por diversos autores. Laranjeira e Leitão (2008), no mesmo estudo acima referido, registaram a presença de fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) apenas nas amostras de água da área recentemente ardida de Penhascoso. Em todos os outros locais as concentrações apresentaram-se inferiores ao limite de detecção (Fig. 46).

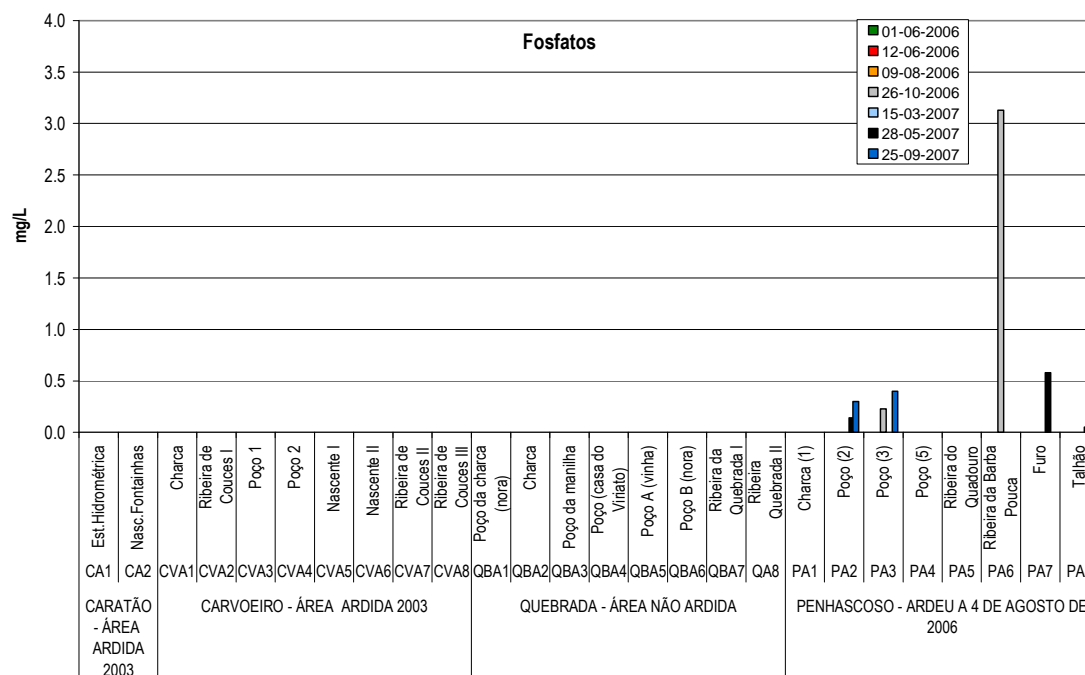


Fig. 46 - Valores de concentração em fosfatos nos quatro locais de estudo (Laranjeira e Leitão, 2008)

### Enxofre

As observações relativas a alterações na concentração de sulfato como resultado de fogos florestais são inconclusivas. Ainda assim, trabalhos desenvolvidos apontam para um aumento da concentração do composto em solos queimados, em zonas de vegetação chaparral (Bitner *et al.*, 2001).

USDA (2005) afirmam que o enxofre é relativamente móvel no sistema solo-água. Relativamente ao processo de mineralização, este é essencialmente semelhante ao do azoto.

Em relação aos recursos hídricos superficiais, Belillas e Roda (1993) notaram um aumento aparente de sulfato em escoamentos superficiais provenientes de uma zona com declive acentuado ardida, quando comparado com uma zona não ardida, embora refiram não ter qualquer significado estatístico.

### Manganés

O manganés é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre e encontra-se largamente distribuído em solos, sedimentos, rochas, água e materiais biológicos. É importante para o crescimento das plantas e em funções vitais dos animais superiores.

Verifica-se que a quantidade de manganés aumenta como consequência do fogo florestal, não só no solo como também no subsolo. Este aumento foi atribuído por Tiedmann *et al.* (1993, in Bitner *et al.*, 2001) ao transporte de manganés sob a forma de complexos orgânicos através

dos macroporos do solo.

Chambers e Attiwill (1994, in Bitner *et al.*, 2001) constataram um aumento da concentração do manganés solúvel na água após o aquecimento do solo à temperatura de 400°C, concentração que essa que voltou aos níveis anteriores ao fogo no período de tempo entre um a dois meses depois do incêndio.

Beschta (1990) notou a ocorrência de uma elevada concentração de manganés num curso de água, durante um período de doze dias depois do incêndio (Bitner *et al.*, 2001).

No projecto FCT "Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos", e na sequência de um fogo florestal que ocorreu na primeira quinzena de Maio de 2005 no vale do Zêzere (Manteigas), fizeram-se colheitas de amostras de água superficial no rio em 30 de Outubro de 2005, logo após as primeiras chuvadas; no dia 3 de Novembro de 2005 e no dia 10 de Novembro de 2005. Os resultados obtidos, confirmaram a existência de valores elevados de Mn na amostra de água recolhida em 30 de Outubro (7810 µg/l), estando cinco dias depois (3 de Novembro) com uma concentração de apenas 14 µg/l e passados mais sete dias não se encontrou manganés acima do limite de detecção (< 1 µg/l). Tal ocorrência é justificada pelo arrastamento das cinzas para as águas do rio Zêzere, devido ao incremento da erosão causada pela precipitação ocorrida após o fogo florestal, a que se seguiu uma rápida diluição.

Chambers *et al.* (1994) citado por Bitner *et al.* (2001) referem um aumento de concentração de Mn em 279% num solo após um incêndio. Outros autores em Bitner *et al.* (2001) referem que a origem dos valores elevados de Mn se pode dever à vegetação queimada, particularmente a folhas de resinosas.

### Cobre

Apesar de ser um dos metais menos abundantes na crosta terrestre, o cobre é um elemento químico indispensável para o desenvolvimento dos vegetais superiores. A sua dinâmica no solo é bastante complexa, sendo afectada por uma série de factores do meio, como a composição química, física e mineralógica do solo, a quantidade de matéria orgânica e o pH.

Bitner *et al.* (2001) aponta que a correlação entre a concentração de cobre nos tecidos das plantas em zonas húmidas e no solo sugere que a queima mobiliza este metal.

Em USDA (2005) refere-se que parte do cobre incorporado nas plantas é volatilizada, sendo libertada do sistema através deste processo.

### Zinco

O zinco desempenha um papel vital no desenvolvimento animal. Na agricultura, os baixos teores deste elemento podem evidenciar áreas com baixa produtividade agrícola e, nesses casos, o zinco pode ser utilizado como suplemento nutritivo para promover o crescimento das plantas.

Bitner *et al.* (2001) apontam que a correlação entre a concentração de zinco nos tecidos das plantas em zonas húmidas e no solo aponta para que a queima mobilize este metal.

Da mesma forma que o descrito para o enxofre, também parte do zinco incorporada nas plantas é volatilizada, sendo libertada do sistema através deste processo (USDA, 2005).

### Césio

O césio é um metal alcalino bastante reactivo. Entre os seus isótopos mais relevantes, encontra-se o césio 137, radionuclídeo artificial, produto da fissão nuclear do urânio-238 e plutónio-239, introduzido no meio ambiente por meio de testes nucleares de superfície entre o início da década de 50 até meados da década de 70. O césio-137 é depositado sobre a superfície terrestre pela precipitação radioactiva dos produtos da fissão gerados após a detonação.

Amiro *et al.* (1996), como resultado de queimas realizadas no terreno e em laboratório, detectaram que, dependendo da vegetação ardida, 10 a 90% do césio mantém-se nas cinzas (Bitner *et al.*, 2001).

Paliouris *et al.* (1955) notaram que o césio 137 ligado à matéria orgânica do solo fica concentrado na camada superficial do solo após um fogo florestal. Estes autores concluem que a carga deste radionuclídeo diminui em área ardida, diminuição essa que é atribuída à volatilização e ao transporte do césio 137 por lixiviação e escorrência superficial (Bitner *et al.*, 2001).

### Cloreto

O cloreto é um composto móvel, necessário à fotossíntese das plantas. Resultados de queimas realizadas por Amiro *et al.* (1996), no terreno e em laboratório, mostram que a quantidade de cloro que se perde para a atmosfera devido a um fogo florestal varia entre 65 e 90%, dependendo do tipo de vegetação ardida. No mesmo estudo refere-se que a solubilidade do cloro se mantém após o fogo (Bitner *et al.*, 2001).

Os trabalhos analisados no âmbito de USDA (2005) concluem que a quantidade deste ião na

água se mantém relativamente baixa após o fogo florestal.

### Iodo

Segundo Amiro *et al.* (1996) a quantidade de iodo que se perde para a atmosfera depende da vegetação ardida e pode variar entre 60 e 80%. A concentração de iodo nas cinzas aumenta até a temperatura de 400°C, mas decresce em fogos que registam temperaturas da ordem dos 1000°C. A solubilidade do iodo também aumenta após o incêndio e é atribuída à destruição dos materiais orgânicos que estavam inicialmente ligados ao iodo (Bitner *et al.*, 2001).

### Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

Os HAPs são formados durante o processo de combustão e podem-se encontrar concentrações elevadas destes poluentes nas emissões e nas partículas emitidas pelos fogos. Contudo, existe pouco trabalho desenvolvido sobre a presença de HAPs nas cinzas e solos florestais (Laranjeira e Leitão, 2008).

Laranjeira e Leitão (2008) estudaram a presença destes compostos nos solos, águas superficiais e subterrâneas. As autoras identificaram 10 dos 16 HAPs considerados prioritários pela US EPA em amostras de solo recolhidas na área de estudo, verificando-se que os valores registados para os HAPs individualmente são bastante inferiores aos esperados. Na maioria das amostras de água superficial e subterrânea analisadas por Laranjeira e Leitão (2008) não se verificou a presença de HAPs. As excepções ocorreram nas amostras recolhidas no talhão de escoamento, onde se verificou a presença de acenafteno e naftaleno.

## **8.4 Principais conclusões de projectos neste domínio**

Existem inúmeros projectos desenvolvidos na Europa e nos EUA sobre os fogos florestais e seus efeitos no meio ambiente. Os principais tópicos de investigação centram-se na análise das razões subjacentes ao aparecimento de fogos, no estudo dos efeitos pós-fogo, em várias vertentes de análise, e na análise de possíveis medidas de minimização desses efeitos. Apresenta-se uma breve síntese de alguns desses projectos de forma a enquadrar as necessidades de investigação referidas na secção seguinte.

***Preliminary Analytical Results for Ash and Burned Soils from the October 2007 Southern California Wildfires*** (United States Geological Survey (USGS), 2007, [http://pubs.usgs.gov/of/2007/1407/pdf/OF07-1407\\_508.pdf](http://pubs.usgs.gov/of/2007/1407/pdf/OF07-1407_508.pdf)).

Este estudo foi desenvolvido pelo USGS com o **objectivo** de identificar que características das cinzas e dos solos provenientes das áreas florestais e residenciais queimadas podem potencialmente afectar de forma adversa a qualidade da água, a saúde pública e que espécies estão potencialmente ameaçadas (Plumlee *et al.*, 2007). O arraste de detritos e as cheias são

também factores considerados no estudo.

O projecto incluiu a recolha e a análise de amostras de cinzas e de solos em 28 locais do sul da Califórnia onde houve fogos (Harris, Witch, Ammo, Santiago, Canyon e Grass Valley). As amostras foram recolhidas todas entre 2 e 9 de Novembro de 2007.

Os **resultados obtidos** permitem diferenciar de forma clara a qualidade das cinzas produzidas em zonas residenciais quando comparadas com as cinzas florestais. Conclui que as águas de escorrência de áreas residenciais ardidas são uma fonte de águas alcalinas com possíveis elevadas concentrações de metais ou metalóides e nutrientes que podem ser causa de problemas de saúde e/ou ambientais. Opostamente, as cinzas de áreas florestais produzem águas com pH também alcalino mas menor, entre 9,8 e 10,9.

O estudo permitiu ainda analisar um conjunto de metais pesados tendo-se concluído que o arsénio, chumbo e antimónio, numa ou mais amostras em áreas residenciais, aparecem em concentrações que se aproximam ou excedem os valores da EPA para solos que requerem reabilitação (0,4–0,62 ppm As; 31 ppm Sb, 150–400 ppm Pb) (EPA, 2004). Os níveis de crómio também são elevados nas cinzas de zonas residenciais (< 354 ppm).

**O USGS (United States Geological Survey)** tem vindo a desenvolver uma série de outros estudos e trabalhos, nas seguintes áreas (<http://pubs.usgs.gov/fs/2006/3015/2006-3015.pdf>):

- ◆ pesquisa sobre fogos florestais que ocorreram no passado, incluindo as fontes de ignição, os padrões de severidade da queima, a época do ano em que ocorrem e as dimensões do fogo (estudo do registo histórico dos fogos e das suas características);
- ◆ estudo dos efeitos pós-fogo, do escoamento e da erosão sobre os ecossistemas aquáticos e espécies;
- ◆ expansão da capacidade de controlar e fornecer alertas antecipados, utilizando novas tecnologias, como por exemplo imagens de satélite;
- ◆ desenvolvimento de ferramentas e de métodos que permitam minimizar impactes sobre os bens materiais e humanos, em particular na interface zona rural – zona urbana.

O USGS realiza ainda cartografia da vegetação e da carga combustível de diversas regiões que serve não só de suporte ao combate aos incêndios (tornando-o mais eficaz), como também permite avaliar e reduzir o risco de incêndio e determinar os efeitos do fogo nos ecossistemas afectados. Estão, também, a ser desenvolvidos métodos que permitem monitorizar a eficácia das acções de limpeza das matas (que permitem reduzir a quantidade de material combustível), os efeitos do fogo sobre os ecossistemas e os efeitos ecológicos das medidas de redução de material combustível, bem como das acções de reabilitação pós-fogo.

Em conjunto com o US Forest Service, a USGS desenvolveu o Fire Pontencial Index (FPI) que



descreve o potencial risco de fogo em função do tipo de ocupação vegetal do solo. Este tipo de mapas utiliza imagens de satélite para avaliar o impacto da vegetação no risco de fogo. Estes mapas são actualizados diariamente de forma a reflectir condições climáticas podendo, desta forma, incorporar esta informação no processo de tomada de decisão.

***Rangeland Assessment, Management and Restoration*** (Agricultural Research Service (ASR), do United States Department of Agriculture, 2005, [http://www.ars.usda.gov/research/projects/projects.htm?ACCN\\_NO=406982&showpars=true&fy=2005](http://www.ars.usda.gov/research/projects/projects.htm?ACCN_NO=406982&showpars=true&fy=2005)).

O estudo dos efeitos do fogo no solo e em cursos de água é considerado um dos **objectivos** mais relevantes deste projecto.

No âmbito deste tópico, os **resultados do projecto** permitiram quantificar os efeitos sobre o solo e o caudal superficial e para recarga, através de medições realizadas pré e pós-fogo, numa bacia experimental. Os efeitos do fogo sobre a variação do caudal constituem um importante impacto que deve ser considerado pelas entidades gestoras da floresta, aquando da realização de queimas controladas como acção de gestão. O ASR, ao monitorizar a utilização da água do solo pela vegetação antes e depois do fogo, num local inicialmente coberto por vegetação densa, demonstrou que, nos dois primeiros anos seguintes à queima controlada, existia mais água disponível para a recarga. Os resultados obtidos permitem fazer previsões acerca dos efeitos do incêndio sobre a recarga e a formação de caudal em bacias hidrográficas, tendo por base as características do solo e da vegetação presente nessa mesma bacia.

O ASR tem vindo a desenvolver outros projectos relacionados com o fogo florestal e consequentes impactes a nível da vegetação e dos recursos hídricos. Os trabalhos do ASR incluem também a definição de estratégias de mitigação direccionadas para o fogo florestal e espécies evasivas, para programas de monitorização e tecnologias para a gestão do risco e para a definição de sistemas de suporte à decisão que apoiem a gestão sustentável da floresta.

***Evaluation of remote sensing for predicting long term hydrological impacts of forest regeneration as a result of bushfire*** (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) da Austrália), 2003-2006, <http://www.csiro.au/files/files/pjh9.pdf>).

A CSIRO é uma organização australiana que tem vindo a desenvolver vários trabalhos relacionados com fogos florestais e os seus impactes. Os trabalhos desenvolvidos direccionam-se para o estudo e a compreensão do comportamento do fogo, levando à definição de novas estratégias e tecnologias que permitem limitar as consequências dos incêndios.

Relativamente aos recursos hídricos, os **objectivos** dos trabalhos realizados no CSIRO incluem o desenvolvimento de modelos que permitem estimar os impactos do fogo florestal nas origens de água para consumo. Para tal, são utilizadas imagens de satélite que, em conjunto com o conhecimento existente do modo como a própria floresta utiliza a água, permitem prever os impactos hidrológicos a longo prazo dos incêndios para uma área piloto árida no Verão de 2002/03, altura em que a Austrália conheceu os maiores fogos florestais da sua história recente, com mais de 15 000 km<sup>2</sup> queimados.

Os **resultados obtidos** permitiram prever a expectativa de aumento da evapotranspiração até 2015-2020 altura em que se prevê o início de um decréscimo gradual. Como consequência é esperado um decréscimo do caudal dos rios a jusante. Contudo estas conclusões têm associadas um conjunto de incertezas resultantes da falta de informação precisa sobre as perturbações causadas da transpiração das plantas e outras componentes do ciclo hidrológico.

***Integrating Fire and Forest Management*** (Canadian Forest Service (CFS), [http://fire.cfs.nrcan.gc.ca/research/management/iffm/overview\\_e.htm](http://fire.cfs.nrcan.gc.ca/research/management/iffm/overview_e.htm)).

O trabalho na área dos fogos florestais centra-se em três áreas principais e **objectivos**:

- ◆ desenvolvimento de um conjunto de procedimentos e de um sistema que permita avaliar o nível de perigo do fogo florestal a uma escala espacial e temporal;
- ◆ criação de estratégias e técnicas que permitam gerir a paisagem no que concerne ao combustível (por exemplo, conversão de combustível, redução, e isolamento) com o objectivo não só de reduzir a área queimada como de serem incorporadas nos planos de gestão florestal e da indústria da madeira;
- ◆ síntese e distribuição de informação relativa à avaliação e mitigação do perigo do fogo para as habitações e comunidades nas zonas de interface urbana – florestal no Canadá.

O CFS desenvolveu também um sistema de classificação do perigo dos fogos florestais, tendo também conduzido vários estudos piloto, assim como técnicas quantitativas para a avaliação espacial do potencial comportamento do fogo.

Esta agência produziu, em conjunto com os Partners in Protection (grupo interdisciplinar no qual a CFS integra e desempenha um papel importante) um pacote de recursos, intitulado *FireSmart: Protecting Your Community from Wildfire* que produziu um livro, um CD-ROM e um website para melhor interacção com a comunidade onde se integra.

**EUFIRESLAB** (*Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a Wall-less Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region*, 5.º Programa-Quadro,

2002-2006, <http://eufirelab.org/unit.php?lang=en>).

O principal objectivo do EUFIRELAB é constituir uma rede Europeia de excelência para as ciências e tecnologias do fogo florestal, no âmbito do 6.º Programa-Quadro.

Os **objectivos gerais do projecto**, desenvolvido por 7 países europeus (incluindo Portugal) passam por permitir uma permuta alargada de conhecimentos, procedimentos, dados, resultados e análises para o desenvolvimento das ciências e tecnologias do fogo florestal na região euro-mediterrânica.

Para além disso, as unidades de investigação visam:

- ◆ desenvolvimento de conceitos, abordagens e linguagens comuns;
- ◆ elaboração de métodos e de protocolos comuns para actividades de investigação e/ou desenvolvimento tecnológico, integrando as escalas espaciais e as utilizações específicas dos espaços naturais euro-mediterrânicos;
- ◆ actualização frequente do estado-da-arte;
- ◆ utilização de metodologias comuns em diferentes domínios;
- ◆ recomendações para a actualização da legislação Europeia;
- ◆ definição de ferramentas específicas, sistemas conviviais de apoio à decisão, para uma melhor gestão dos dados.

Também são estabelecidos objectivos tecnológicos para dar respostas aos utilizadores finais, tais como:

- ◆ condições para o uso do fogo controlado tendo em vista a gestão da biodiversidade;
- ◆ regras para a coordenação do combate ao incêndio e para a gestão da interface florestal / urbana.

Em termos de **resultados**, este projecto destaca-se pela importância atribuída às tecnologias de informação e de comunicação, podendo mesmo ser considerado como um trabalho pioneiro na vertente dos métodos de trabalho e de interligação entre os diferentes países parceiros.

Como principais conclusões, destacam-se as obtidas nas abordagens utilizadas na modelação dos combustíveis florestais que permitiu prever a potencial quantidade de energia libertada durante o fogo florestal e/ou queimas controladas. Aponta-se para a dificuldade inerente à comparação de diferentes modelos relativamente ao comportamento dos fogos florestais (EUFIRELAB, 2006a).

**EROSFIRE** (*Ferramenta de Apoio na Decisão, para Identificação, com Base em Modelação, de Risco de Erosão do Solo após Incêndios Florestais*, FCT - POCI/AGR/60354/2004, 2005-2008, <http://www2.dao.ua.pt/REC NATUR/EROSFIRE/index.htm>).

O principal **objectivo** deste projecto liderado pela Universidade de Aveiro é desenvolver uma ferramenta de software, integrada numa aplicação SIG, que permita avaliar e mapear, à escala de declives individuais de encostas, o risco de erosão do solo em áreas florestais recentemente ardidadas, para diferentes cenários de gestão do solo após incêndio, incluindo sem intervenção, e considerando diversas medidas de controlo e mitigação da erosão.

O projecto EROSFIRE encontra-se presentemente em desenvolvimento, e divide-se em seis conjuntos principais de tarefas a seguir descritas.

WP1 – Simulação de chuva

WP2 – Selecção dos locais de estudo e descrição

WP3 – Instrumentação e monitorização dos locais de estudo permanentes

WP4 – Análises de laboratório de amostras de solo e de escorrência

WP5 – Modelação da erosão do solo a multi-escala

WP6 – Avaliação do risco de erosão após incêndios florestais, assim como para cenários de intervenção

**Impacte dos Fogos Florestais na Qualidade Ecológica das Ribeiras de Monchique**, (FCT - POCI/AMB/60266/2004, 2005-2008,  
[http://www.otic.uevora.pt/index.php/otic/id/projectos/projecto/\(id\)/844/?language=por-PT](http://www.otic.uevora.pt/index.php/otic/id/projectos/projecto/(id)/844/?language=por-PT))

O **objectivo** deste projecto liderado pela Universidade de Évora é avaliar o impacte dos fogos florestais a nível temporal e a nível espacial. Relativamente ao nível temporal, as características de um conjunto de locais serão comparadas antes e depois dos fogos. Relativamente à abordagem espacial, serão comparados locais afectados e não afectados pelos fogos florestais. Com estas duas abordagens esperam-se obter resultados referentes não só ao impacte dos fogos, como também sobre a respectiva taxa de recuperação dos ecossistemas. Estes resultados serão correlacionados com a descrição das bacias de drenagem efectuada por SIG. Como resultados finais prevê-se o desenvolvimento de metodologias de avaliação da qualidade ecológica especialmente direccionadas para os impactes dos fogos florestais. Em termos gerais obter-se-á uma melhor compreensão do impacto dos fogos florestais nos ecossistemas aquáticos, permitindo a adopção das medidas de gestão ambiental mais apropriadas.

**INFERNO** (A Influência dos Fogos Florestais na Organização das Comunidades Dulceaquícolas, FCT - PTDC/AMB/76006/2006, 2008-2010,  
<http://www.cesam.ua.pt/index.php?menu=87&language=pt&tabela=projectos&page=6>)

Os objectivos deste projecto são providenciar um estudo sistemático dos efeitos do fogo nos ecossistemas de rios de Portugal. São usadas metodologias de análise padronizadas com base

em peixes e macroinvertebrados, para descrever as respostas das comunidades ecológicas e do habitat às mudanças associadas com o fogo. Através de levantamentos numa série de locais, os investigadores documentarão a resposta inicial de peixes e macroinvertebrados ao fogo e a subsequente dinâmica das comunidades associada a perturbações adicionais, tais como "eventos de precipitação" que são, na maioria das vezes, mais nefastos do que o fogo propriamente dito. Enquanto estes levantamentos irão cobrir os estádios iniciais da recuperação ecológica, serão também usados dados históricos para identificar sítios afectados pelo fogo numa escala temporal (até há 20-30 anos) providenciando informação cronológica sobre a recuperação ecológica a longo prazo.

Para além de fornecer provas que podem ser usadas para pôr hipóteses sobre os processos mecânicos associados aos impactes do fogo, a informação obtida irá ser usada para criar uma série de ferramentas de diagnóstico com a intenção de identificar rios mais sensíveis ao fogo, prever a gravidade da perturbação ecológica após um determinado fogo e fornecer uma medida relativa da degradação induzida pelo fogo.

## **8.5 Necessidades de investigação**

Pese embora todo o trabalho de investigação realizado nos últimos anos tendo em vista a prevenção e a mitigação, os fogos florestais continuam a ser um problema crescente em diversos países Europeus da zona mediterrânica. Devido ao aquecimento global, a questão dos fogos na Europa poderá deixar de ser um problema estritamente da Europa Mediterrânica para vir a alastrar-se à Europa Central e do Norte.

Os fogos florestais, para além dos danos sociais e ambientais que causam, têm também como resultado outras graves consequências económicas, não apenas devido aos estragos directos causados, mas também por causa dos enormes volumes financeiros envolvidos no combate aos incêndios, bem como nas medidas de prevenção e de mitigação. Os fogos florestais constituem também um claro recuo nos esforços realizados no sentido de diminuir a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida para a atmosfera (Phoenix, 2007).

Os diversos trabalhos de investigação que têm sido desenvolvidos centram-se em quatro vertentes distintas que incluem a análise de:

1. características dos fogos florestais (*e.g.* quantidade de energia libertada, tempo de residência, comprimento das chamas), do regime do fogo (*e.g.* dimensão, tempo de retorno) e das cinzas produzidas em diversos contextos de clima, topografia e geologia;
2. efeito dos fogos na flora e na fauna;
3. efeito dos fogos nas características físicas e químicas dos solos e das águas e
4. medidas de mitigação pós-fogo, no âmbito das componentes: flora, fauna, solos e águas.

Dentro do domínio de interesse deste Programa, existem diversos aspectos que requerem uma investigação mais aprofundada em resultado do elevado grau de incerteza e variabilidade nas respostas do meio ambiente às diferentes características do fogo. Este aprofundamento dos conhecimentos deve ser complementado, nomeadamente incorporando as eventuais alterações nas características e no regime dos fogos que possivelmente decorrerão das alterações climáticas.

Dentro dos aspectos de quantidade e de qualidade dos solos e das águas há a considerar as questões relacionadas com: (1) a erosão dos solos, (2) a alteração do ciclo da água (com alteração da capacidade de infiltração e com alteração de caudais superficiais), e (3) as alterações à qualidade dos solos e das águas.

A análise da erosão do solo pós-fogo e do desmoronamento de terras implica a realização de análises de vulnerabilidade e o desenvolvimento de modelos de previsão, fundamentais no suporte à tomada de decisão no que concerne a reabilitação de emergência de áreas ardidas.

Eventos de precipitação intensa que ocorram em áreas ardidas recentemente podem potenciar a erosão e o escoamento superficial, com repercussões na degradação da qualidade da água que não se limitam somente às áreas ardidas. De facto, se a precipitação que cair depois do incêndio for em grande quantidade, ou muito intensa e concentrada num pequeno período de tempo, acelera a erosão, e pode formar-se escoamento superficial com elevada matéria em suspensão, mesmo após um fogo controlado. Desta forma, é importante que a investigação tenha em atenção os picos de escoamento e as cheias, com enfoque na compreensão dos potenciais impactes no ambiente que podem ser maiores que o fogo em si mesmo.

No que diz respeito às alterações da qualidade dos solos e das águas, é necessário aumentar o conhecimento relativo aos efeitos do fogo nas propriedades químicas dos solos em Portugal, o que permite uma melhor gestão de incêndio em todos os ecossistemas de forma geral, e em particular daqueles que dependem dos solos. A capacidade de prever a magnitude e duração de eventuais alterações à qualidade da água é ainda limitada.

Phoenix (2007) sugere uma linha de investigação onde sejam identificadas e compreendidas as relações entre as características do comportamento do fogo florestal e os efeitos do fogo nos solos, no ciclo do carbono (armazenamento e libertação) e no ciclo dos nutrientes.

No triângulo planta – erosão – qualidade da água (superficial e subterrânea) perceber qual é a ligação entre os nutrientes libertados pela planta durante o incêndio (cinzas) com os solos e água. Neste âmbito, propõe-se o estudo de quais os nutrientes que ficam retidos, quais os que lixiviam, como se relacionam entre si, com o meio onde se encontram e com as plantas existentes na área de estudo.

Em complemento à análise do efeito directo dos fogos, há toda uma área de gestão e de

reabilitação pós-fogo das áreas ardidas em que é necessário investir. Diversas questões são colocadas ao nível dos processos de avaliação dos prejuízos causados pelo fogo em termos económicos, da gestão de áreas e árvores ardidas, da prevenção da erosão do solo e do escoamento superficial. Por outro lado, os fogos florestais podem ser encarados como uma oportunidade de planear e estabelecer florestas menos combustíveis e mais resilientes em áreas ardidas.

A disponibilidade de informação relativa a estas questões e como devem os actores e os responsáveis políticos reagir após incêndios de maior dimensão constitui também uma lacuna na investigação realizada na Europa, sendo necessário adquirir conhecimento sobre como gerir os milhões de hectares ardidos na EU, incluindo o planeamento da gestão pós-fogo, as intervenções a curto prazo para minimizar a erosão do solo e o escoamento superficial, e a qualidade da água a longo prazo.

As questões-chave a serem investigadas são a avaliação da eficiência e das limitações das várias técnicas de gestão pós-fogo, a conservação do solo e da água (*e.g.* cobrir com mistura de palha húmida, folhas e outras matérias vegetais, sementeiras, criar represas com troncos cortados), a recuperação da qualidade dos solos (medidas de correcção dos solos) e das suas propriedades, a reflorestação (selecção das espécies vegetais, sistemas radiculares), o solo, o escoamento superficial e a qualidade da água (Phoenix, 2007).







## **9 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E A QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

---

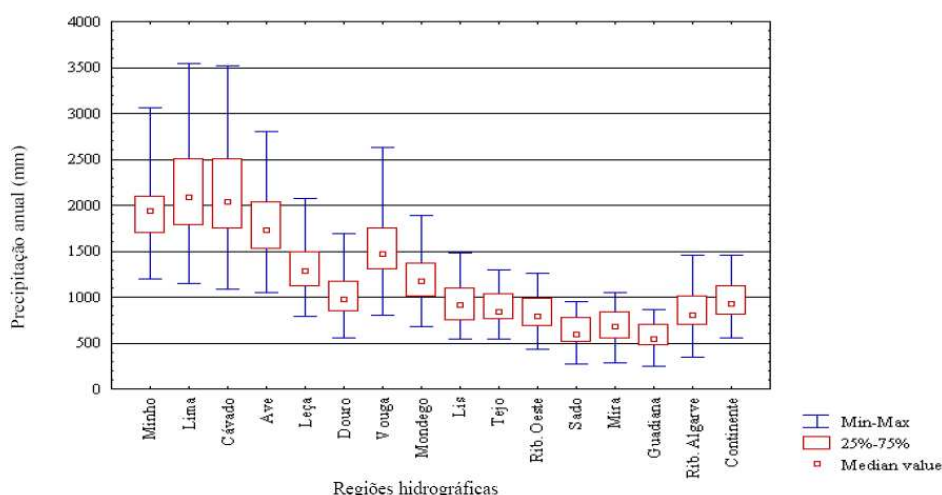
### **9.1 Introdução**

O clima da Terra influencia sobremaneira as características do ciclo hidrológico e, desse modo, afecta diversos aspectos relacionados com o uso da água para consumo humano e para a produção de alimentos, influenciando directamente a saúde humana e os ecossistemas associados e indirectamente muitos outros aspectos relativos ao uso e ao aproveitamento dos recursos hídricos.

O clima actual em Portugal Continental regista valores médios anuais de precipitação e de evapotranspiração, respectivamente, de cerca de 960 mm e de 575 mm, determinando um escoamento médio anual da ordem dos 385 mm, mas a variabilidade interanual e espacial da precipitação e, por consequência, do escoamento é muito elevada (PNA, 2001; PNPOT, 2006, cf. Fig. 47). De facto, em cerca de 25% dos anos ocorrem valores de escoamento superficial superiores a 550 mm ou inferiores a 250 mm.

A aparente riqueza hídrica do nosso País, onde as disponibilidades anuais médias excedem várias vezes as necessidades de água, esconde situações localizadas de escassez que ocorrem ciclicamente durante períodos secos (PNPOT, 2006). A procura da água caracteriza-se, assim, por um desajustamento espacial e temporal em relação às disponibilidades hídricas.

Esta grande variabilidade da disponibilidade de água em Portugal Continental, em termos anuais e interanuais, implica que seja feita uma gestão interanual que considere não apenas o tradicional armazenamento em albufeiras, mas que inclua também o armazenamento em aquíferos, através de recarga artificial, de modo a garantir o abastecimento para os diversos usos.



Fonte: Plano Nacional da Água, 2001

Fig. 47 - Precipitação anual média por região hidrográfica (extraído de PNPOT, 2006)

Neste capítulo analisam-se os principais efeitos que as características de variabilidade do clima actual podem ter na qualidade e quantidade dos recursos hídricos subterrâneos. Apresenta-se brevemente o estado da arte neste domínio, os potenciais impactes das alterações climáticas nas águas subterrâneas, os principais projectos e suas conclusões neste domínio e termina-se com uma análise das necessidades de investigação.

## 9.2 Estado da arte sobre alterações climáticas

### 9.2.1 Síntese do estado do conhecimento global

Expor de forma clara quais os impactes que as alterações climáticas podem ter no estado dos recursos hídricos é, por si só, um desafio difícil, que é ainda potenciado pela permanente necessidade de actualização que exige, na medida em que muito do conhecimento se encontra em contínua aquisição e porque existem diversas incertezas associadas, resultantes da própria natureza das questões climáticas.

Associado aos aspectos ambientais há ainda as incertezas resultantes das projecções relativas aos aspectos humanos que podem influenciar as alterações climáticas, eventualmente amplificando as suas proporções, como sejam o crescimento da população e as consequentes alterações a nível das necessidades de água, da indústria e da agricultura que, por seu lado, dependem da resposta política e institucional adoptada para os diversos sectores e escalas regionais e nacionais.

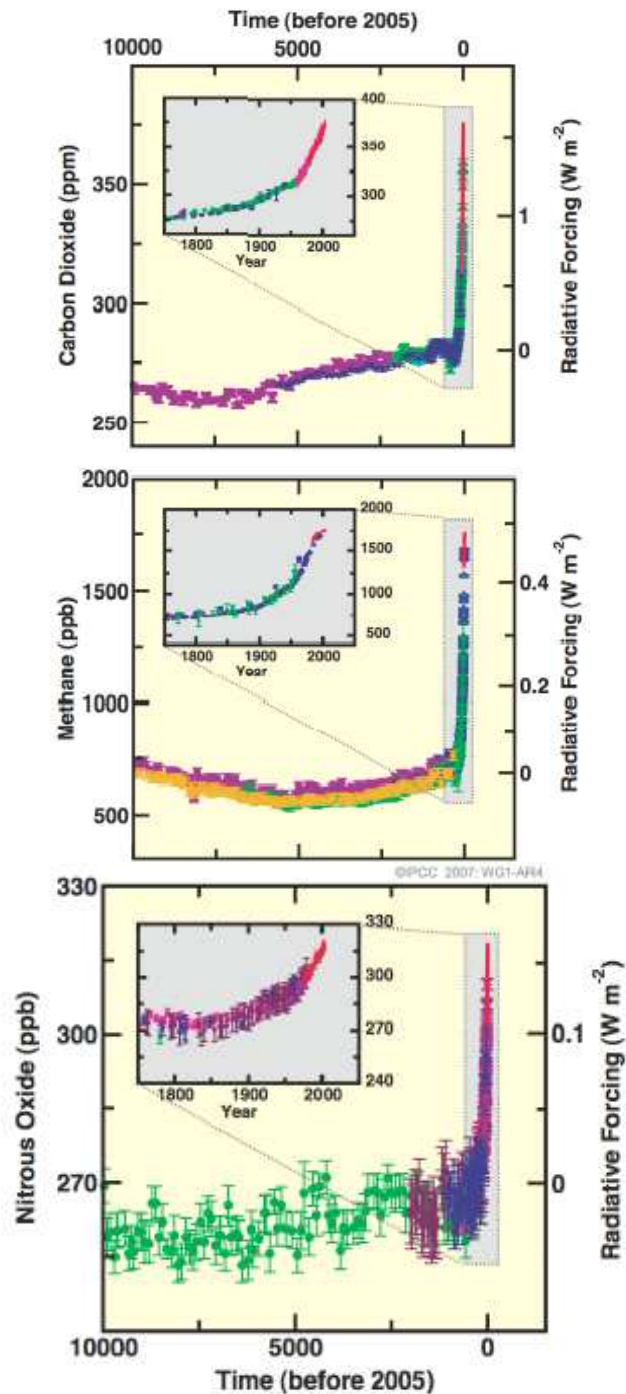
O actual estado de conhecimentos sobre as alterações climáticas evidencia um conjunto de mudanças do clima que devem ser tidas em consideração no sentido de inverter as tendências observadas, através da adopção de acções preventivas e adaptativas. As incertezas existentes

sobre alguns aspectos mais complexos da ciência e da modelação atmosféricas não devem servir como forma de protelar decisões e acções que devem ter lugar no presente.

Desde os finais da década de 80 tem sido feito um enorme esforço no sentido de melhorar a compreensão global sobre o sistema atmosférico e o seu comportamento, de que se destaca os trabalhos realizados para o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), uma organização científica sob os auspícios da Organização Mundial de Meteorologia e do Programa Ambiental da Nações Unidas que visa a análise do clima para vários anos e que conta com a colaboração de reputados climatologistas de mais de 120 nações. O IPCC emite periodicamente relatórios cujo conteúdo e cenários propostos têm vindo a constituir referência para estudos posteriores efectuados a escalas regionais. O primeiro relatório IPCC foi editado em 1990, o segundo em 1995, o terceiro em 2001 e o último em 2007 (cf. <http://www.ipcc.ch/>).

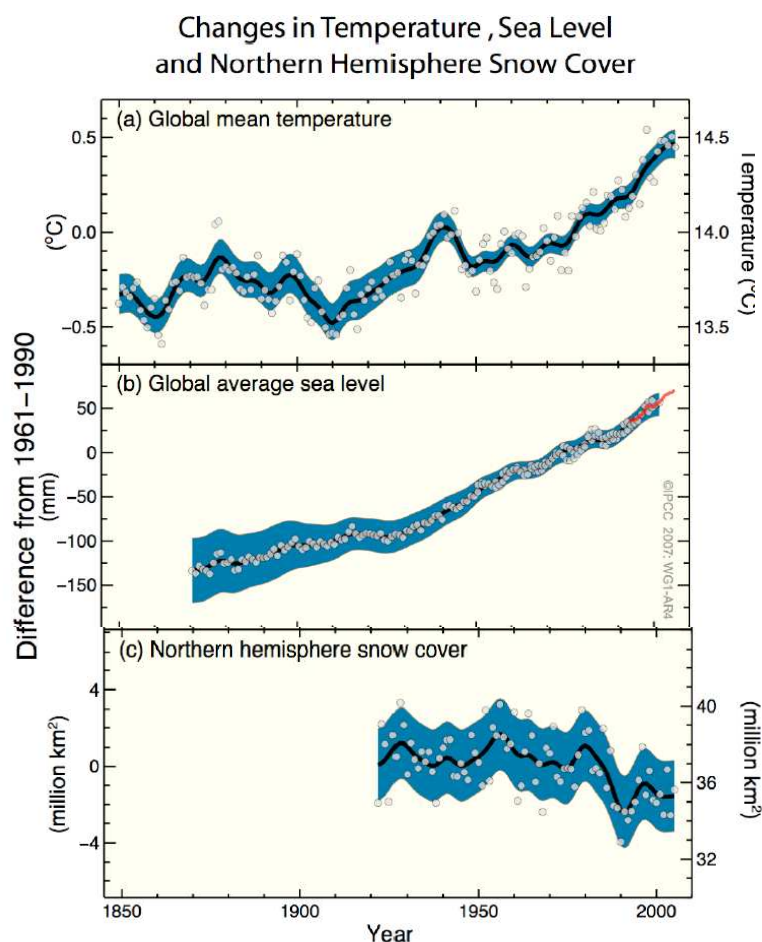
Pese embora todas as incertezas associadas aos modelos de previsão do clima, aos modelos globais de circulação, aos dados e modelos hidrológicos, às incertezas resultantes das diferentes escalas de análise e ao impacte que essas alterações poderão ter, há aspectos sobre os quais mais de 20 anos de pesquisas permitem estabelecer conclusões claras. Uma das realidades científicas observada é o aumento das emissões resultantes das actividades humanas, com conseqüente aumento substancial das concentrações atmosféricas em gases com efeito de estufa, tais como: dióxido de carbono; metano; clorofluorcarbonetos e óxido nítrico (Gleick *et al.*, 2001; IPCC, 2007; cf. Fig. 48). Esse aumento resulta num reforço do efeito de estufa com conseqüente aumento da temperatura à superfície da Terra (cf. Fig. 49). Estas alterações ir-se-ão por sua vez repercutir na disponibilidade e procura de água, na sua qualidade, e na saúde funcionamento dos ecossistemas aquáticos associados.

## Changes in Greenhouse Gases from ice-Core and Modern Data



Observed changes in (a) global average surface temperature; (b) global average sea level rise from tide gauge (blue) and satellite (red) data and (c) Northern Hemisphere snow cover for March-April. All changes are relative to corresponding averages for the period 1961-1990. Smoothed curves represent decadal averaged values while circles show yearly values. The shaded areas are the uncertainty intervals estimated from a comprehensive analysis of known uncertainties (a and b) and from the time series (c).

Fig. 48 - Concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e ácido nítrico nos últimos 10 000 anos (gráficos maiores) e desde 1750 (gráficos ampliados). As medidas provêm de amostragem em sondagens no gelo (cores diferentes são relativas a estudos diferentes) e amostras da atmosfera (linhas encarnadas) (extraído de IPCC, 2007)



Observed changes in (a) global average surface temperature; (b) global average sea level rise from tide gauge (blue) and satellite (red) data and (c) Northern Hemisphere snow cover for March–April. All changes are relative to corresponding averages for the period 1961–1990. Smoothed curves represent decadal averaged values while circles show yearly values. The shaded areas are the uncertainty intervals estimated from a comprehensive analysis of known uncertainties (a and b) and from the time series (c).

Fig. 49 - Observações registadas na (a) temperatura média da superfície, (b) média global do nível médio do mar e (c) superfície nevada no hemisfério norte para os meses Março-Abril (extraído de IPCC, 2007)

A temática das alterações climáticas e as suas implicações ao nível do ciclo hidrológico é um dos aspectos centrais dos estudos realizados (Jacobs *et al.*, 2001). O IPCC vem reforçando, através dos vários relatórios publicados, a necessidade de melhorar a flexibilidade da gestão da procura de água de forma a fazer face às incertezas das alterações climáticas. A análise desta e de outras questões específicas em torno da temática *alterações climáticas e a água* foi recentemente publicada num relatório técnico do IPCC (Bates *et al.*, 2008) que, nas suas duzentas páginas, dissecou este assunto nas suas várias vertentes e aponta as principais medidas a tomar no sentido da adaptação e mitigação das questões abordadas.

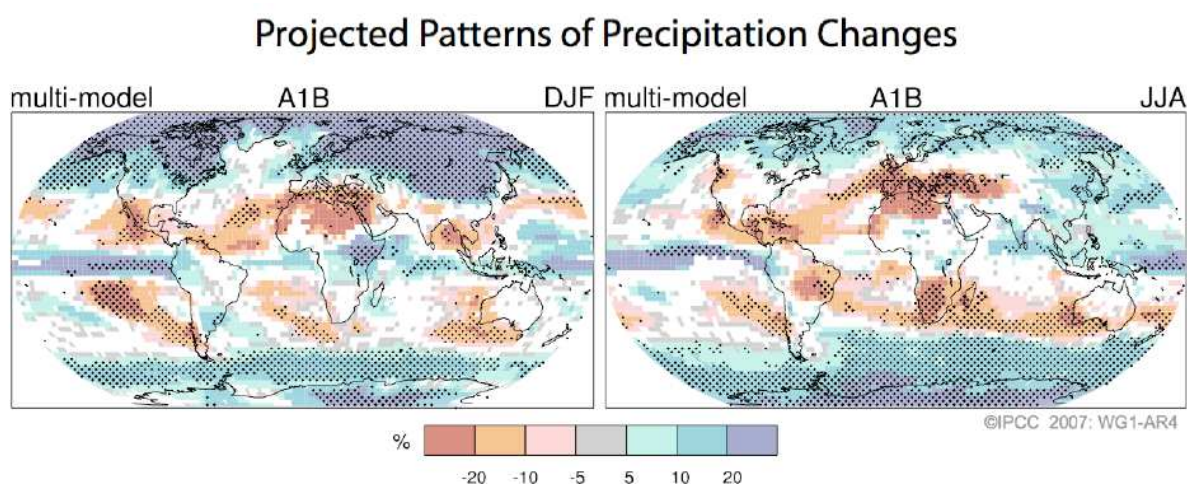
Com base em observações efectuadas ao longo de várias décadas, Gleick *et al.* (2001) e Bates *et al.* (2008) sintetizam o conjunto principal dos efeitos das alterações climáticas (expresso através dos elementos precipitação, temperatura e evaporação/evapotranspiração) no ciclo

hidrológico da seguinte forma:

- ◆ aumento global da média de precipitação, de evaporação e de evapotranspiração;
- ◆ aumento da temperatura global e regional;
- ◆ aumento da humidade atmosférica;
- ◆ alterações nos padrões de precipitação (e neve), nomeadamente frequência, intensidade e extremos;
- ◆ redução da cobertura de gelo e intensificação do degelo em épocas diferentes;
- ◆ elevação do nível médio da água do mar.

Este conjunto de alterações terá impactes ao nível do ciclo hidrológico, alterando a sazonalidade do escoamento superficial e da recarga de aquíferos, implicando a subida do nível do mar (também devida ao aumento do volume causado pela expansão térmica da água) e causando alterações ao nível da qualidade da água.

Os mesmos autores referem, com base em diversos estudos, que se estima que a intensidade de precipitação seja maior em elevadas latitudes e nos trópicos e que decresça nalgumas zonas subtropicais e de baixa a média latitude (10°S to 30°N), factos que se observam já desde a década de 70 (Bates *et al.*, 2008). O aumento da concentração em CO<sub>2</sub> também se reflecte no aumento da humidade atmosférica. O IPCC (2007) apresenta os resultados para os padrões de precipitação esperados até ao final deste século, com base num conjunto de cenários da subida das temperaturas obtidos por diferentes modelos (cf. Fig. 50).



*Relative changes in precipitation (in percent) for the period 2090–2099, relative to 1980–1999. Values are multi-model averages based on the SRES A1B scenario for December to February (left) and June to August (right). White areas are where less than 66% of the models agree in the sign of the change and stippled areas are where more than 90% of the models agree in the sign of the change.*

Fig. 50 - Mudança relativa nos padrões de precipitação com base em estimativas efectuadas para o período 2090-2099, relativamente aos valores para o período 1980-1999 (extraído de IPCC, 2007)

Uma das mais importantes alterações induzidas pelas alterações climáticas no ciclo hidrológico

deve-se às mudanças na queda de neve e no degelo resultantes do aumento da temperatura. Estas alterações causam um aumento do pico de escoamento, a sua antecipação no ano hidrológico, e uma mais rápida e intensa perda da humidade do solo na época de Verão. Estes processos serão responsáveis pela intensificação de processos de cheia no período do Inverno e Primavera, a par com períodos de seca na época estival.

Na maioria dos modelos utilizados, as alterações previstas para a precipitação e temperatura resultam também em equivalentes alterações do escoamento superficial, em grande parte porque a precipitação é o factor primário que determina o escoamento. Assim, em termos genéricos para o planeta e com diversas excepções resultantes de diversas variáveis que podem estar em jogo, verificar-se-á um aumento do escoamento a latitudes elevadas e algumas zonas húmidas tropicais e um decréscimo nas áreas subtropicais áridas e semiáridas (Gleick *et al.*, 2001, IPCC, 2007 e Bates *et al.*, 2008, cf. Fig. 50).

Um outro aspecto resultante das mudanças na precipitação e evapotranspiração é a humidade do solo e na recarga das águas subterrâneas. A humidade do solo é determinada pelo tipo de solo, pelo tipo de ocupação vegetal, pela intensidade de precipitação e pela evapotranspiração. A sua importância é crucial para os ecossistemas que suporta e para a agricultura. Maior precipitação implica maior humidade do solo para o respectivo período, o que se espera venha a ocorrer para o período de Inverno, embora para o restante período do ano possa apresentar valores de humidade mais baixos em relação a valores de referência. Por seu lado, o aumento da temperatura pode ser responsável pela maior evapotranspiração e, assim, pelo decréscimo da humidade.

Nas áreas emersas cobertas por gelo haverá um aumento da humidade do solo, com o conseqüente aumento do volume de águas subterrâneas e dos níveis geológicos por onde circula. Esta situação tenderá a repercutir-se num aumento do escoamento de base nos rios, embora o aumento da evapotranspiração e a diminuição do volume de gelo derretido possam contrariar este efeito.

Em termos de águas subterrâneas, assunto mais desenvolvido na Secção 9.3, embora o número de estudos efectuados à escala mundial seja bastante reduzido quando comparado com outros aspectos, espera-se que as alterações na precipitação e temperatura tenham os seus efeitos mais directos na variação do regime de recarga, em função do regime de precipitação (intensidade, duração) e da época de recarga. Em áreas mais frias a diminuição do período em que o solo está coberto de gelo pode aumentar a infiltração. Por outro lado, a maior evapotranspiração ou menor precipitação poderá corresponder um défice de recarga. Um outro aspecto abordado em relação às águas subterrâneas é o efeito potencial que o aumento do nível do mar terá em termos de potenciar a intrusão marinha em aquíferos costeiros, o que por sua vez dependerá dos gradientes hidráulicos e das extracções observadas em cada situação.

Os efeitos das alterações climáticas podem repercutir-se em diversas outras vertentes relacionadas com os recursos hídricos e ecossistemas associados, não só de forma directa, mas também através de impactes indirectos como a alteração dos volumes de água disponíveis para consumo humano e para a agricultura e a qualidade da água, bem como para as infra-estruturas instaladas para a navegabilidade em rios, a produção de energia hidroeléctrica, a defesa contra cheias e a drenagem e irrigação, entre outros.

A juntar aos efeitos directos das alterações climáticas há um conjunto de aspectos relativos ao futuro do planeamento e da gestão dos recursos hídricos, que decorrem da evolução esperada, e que, no seu conjunto, contribuirão para aumentar o stress hídrico e potenciar mais os efeitos das alterações climáticas. Morris *et al.* (2003) destacam os seguintes aspectos:

- as projecções para o crescimento global da população indicam um aumento de 20% de 2000 para 2015, *i.e.* 6 mil milhões para mais de 7 mil milhões em 2015 e de 30% até 2025, com 7,8 mil milhões;
- as cidades urbanizadas estão a crescer a um elevado ritmo, com a população que vive em cidades a crescer de 2,8 mil milhões para 3,8 mil milhões em 2015 e para 4,5 mil milhões em 2025;
- a poluição das águas é responsável pela morte de 25 milhões de pessoas todos os anos, em especial nos países em desenvolvimento, sendo metade das doenças transmitidas através da água;
- cerca de 2/3 do consumo de água é destinado à agricultura, sendo a salinização dos solos e das águas subterrâneas uma das principais ameaças à sustentabilidade dos recursos hídricos;
- a indústria da água irá seguramente aumentar os seus serviços em países em desenvolvimento, cujos montantes em 1990 eram de apenas 15% do valor mundial.

Nas secções seguintes apresenta-se de forma mais aprofundada as questões relativas às alterações climáticas e seus potenciais impactes na qualidade das águas subterrâneas, nomeadamente através do resultado de projectos realizados neste domínio, procurando apresentar as necessidades de investigação nesta área.

### **9.2.2 Síntese da informação para Portugal**

A compilação da análise das alterações climáticas, incluindo a avaliação de impactes e medidas de adaptação multisectorial e integrada, para Portugal Continental e para as Regiões Autónomas dos Açores e Madeira, foi efectuada no âmbito do Projecto SIAM I e II com início em 1999 e término em 2003 (cf. Comissão Nacional para as Alterações Climáticas, 2001; SIAM I, 2002 e SIAM II, 2006). Os impactes relativos aos recursos hídricos foram elaborados por Cunha *et al.* (2006), no âmbito do projecto SIAM II.

O historial dos principais estudos relativos aos impactes das alterações climáticas que têm



vindo a ser desenvolvidos para Portugal desde a década de 80, bem como as respectivas publicações é, citando Novo (2007):

- ◆ Dias e Taborda (1988) e (1992) (cf. Novo, 2007) – estudo da subida do nível do mar para Portugal Continental, determinando tendências de alteração do nível do mar para o período até 2100. Os seus resultados foram incorporados posteriormente no estudo SIAM.
- ◆ Lobo Ferreira (1991) – estudo para a ilha de S. Miguel (Açores) sobre o impacte das alterações nos valores da precipitação sobre a recarga de aquíferos.
- ◆ Brandão *et al.* (2000 in Novo, 2007) – estudo das precipitações extremas para Portugal Continental, incluindo a distribuição espacial das precipitações e eventos extremos.
- ◆ DROTRH e IA (2001) – análise, baseada no estudo de Azevedo e Gonçalves (1993), da evolução da temperatura e precipitação, de 1874 a 1992 (estação de Angra do Heroísmo), definindo uma tendência de descida da temperatura média, mínima e máxima; para a precipitação assinalam uma tendência de subida (sem definirem valores). Faz ainda referências gerais à possível subida do nível do mar, erosão costeira e alteração dos regimes torrenciais.
- ◆ Plano Regional da Água dos Açores (2001) – apresenta indicações qualitativas sobre problemas que possam ocorrer com a subida do nível do mar e uma análise para a ilha Terceira das tendências evolutivas da precipitação e temperatura desde 1874 a 1992, de acordo com o estudo desenvolvido por Azevedo e Gonçalves (1993).
- ◆ Novo, M. E. (2003) – estudo das alterações climáticas e seus impactos nos recursos hídricos subterrâneos em ilhas: caso de estudo dos Açores.

Mais recentemente foram publicados trabalhos específicos sobre as alterações climáticas e os recursos hídricos subterrâneos, alguns dos quais vieram posteriormente a ser integrados no SIAM II, cf. Nascimento *et al.* (2004), bem como trabalhos realizados no âmbito do projecto do LNEC "Análise dos efeitos das alterações climáticas nos sistemas hídricos subterrâneos" que analisam os efeitos das alterações climáticas nos aspectos quantitativos das águas subterrâneas, em ilhas e para uma área no Norte de Portugal:

- ◆ Novo, M. E., 2007 - *Alterações Climáticas e seus Impactos nos Recursos Hídricos Subterrâneos em Ilhas de Pequena Dimensão (Caso de Estudo: Açores – Ilha Terceira)*. Tese de Doutoramento em Engenharia do Ambiente desenvolvida no LNEC e apresentada à Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo, Fevereiro de 2007, 290 pp.
- ◆ Oliveira, M.M., Novo, M.E. e Lobo Ferreira, J.P., 2007 - *Models to Predict the Impact of the Climate Changes on Aquifer Recharge*. In Lobo Ferreira, J.P; Vieira, J. (eds.) – "Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability", IAHS Red Books, London, IAHS Publication 310, ISBN 978-1-901502-88-6, pp. 103-110.
- ◆ Oliveira, L. G. S., 2007 - *Soluções para uma Gestão Adequada de Bacias Hidrográficas e de Sistemas Aquíferos, em Cenários de Escassez Hídrica Extrema*. Dissertação desenvolvida no LNEC e apresentada ao Instituto Superior Técnico para a obtenção do grau Mestre em Engenharia do Ambiente. Lisboa, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa.

- Novo, M. E. e Lobo Ferreira, J.P., 2008a - *Alterações climáticas e seus impactos em recursos hídricos subterrâneos de zonas insulares - Recarga de aquíferos*. CLIMA 2008 - 1.º Congresso Nacional de Alterações Climáticas, poster.
- Novo, M. E. e Lobo Ferreira, J.P., 2008b - *Alterações climáticas e seus impactos em recursos hídricos subterrâneos de zonas insulares - Vulnerabilidade de aquíferos*. CLIMA 2008 - 1.º Congresso Nacional de Alterações Climáticas, poster.

O trabalho desenvolvido em Oliveira (2007) pretendeu testar a aplicabilidade da gestão integrada de recursos hídricos a um caso de estudo, com recurso a técnicas de recarga artificial do sistema aquífero de Querença-Silves, com o intuito de solucionar parcialmente os efeitos de futuras secas no Algarve.

Apresentam-se alguns dos resultados principais dos estudos acima mencionados. Segundo Miranda *et al.* (2006), em SIAM II, as observações efectuadas para Portugal são consistentes com um padrão de aquecimento global em aceleração, apresentando mesmo taxas de aquecimento acima da média global. As tendências de precipitação nas últimas décadas indicam um aumento da sua variabilidade no Inverno, uma redução da precipitação de Março, no Continente, e uma maior frequência de seca.

Segundo os mesmos autores, os inúmeros cenários disponíveis sugerem importantes alterações climáticas no continente (cf. Fig. 51) e nas ilhas, sendo o aquecimento mais dramático no Continente e mais moderado nos Açores. Efectivamente, os cenários de aquecimento agravam as tendências já observadas do aumento da temperatura e da provável redução de precipitação, *i.e.* com a estação chuvosa mais curta e a provável maior variabilidade interanual.

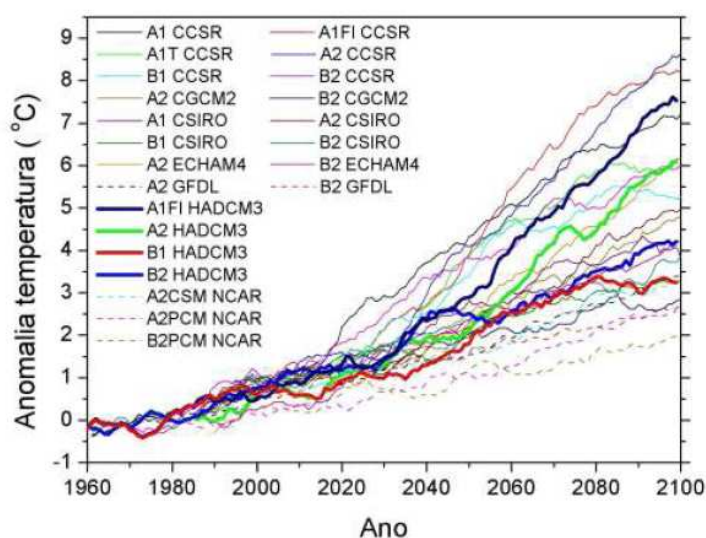


Fig. 51 - Evolução da anomalia da temperatura média anual na Península Ibérica para diversos modelos globais (GCMs), calculada como a diferença entre as simulações com o aumento de CO<sub>2</sub> e a média do período de controlo (extraído de SIAM II)

A alteração do regime de precipitação é preocupante no Continente onde se registará menos precipitação e uma redução da duração da estação chuvosa, sendo estas tendências mais acentuadas nas regiões Centro e Sul e com leve incremento de precipitação na zona NW (Minho). Na Madeira as tendências mostram muito menos chuva de Inverno e anual, sugerindo alterações no sentido da desertificação (Miranda *et al.*, 2006) (cf. Fig. 52).

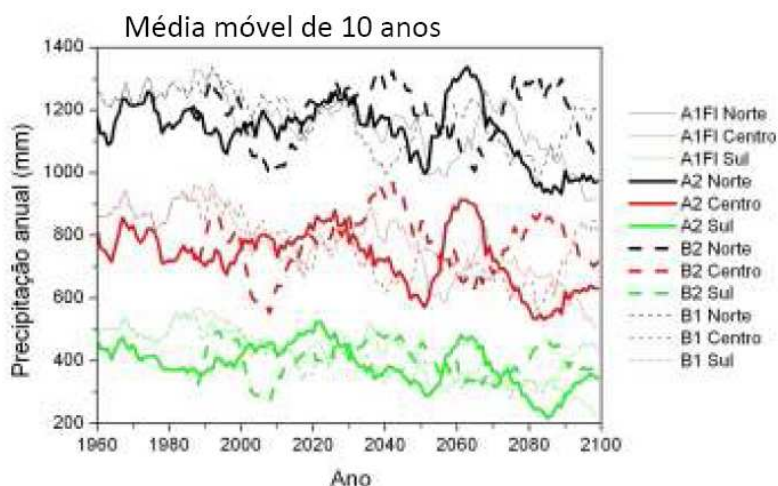


Fig. 52 - Séries temporais de precipitação anual nos três pontos, Norte, Centro e Sul da zona Oeste da Península Ibérica para o modelo HadCM3 forçado com os cenários SRES-A1FI, A2, B1, B2 (extraído de SIAM II)

Estes cenários de menor disponibilidade de água, maiores taxas de evaporação e de decréscimo da humidade no solo, principalmente no Sul do Continente e na Madeira, conduzirão a uma maior procura de água agravando os efeitos directos das alterações climáticas.

O projecto SIAM II chama a atenção para o facto de existirem incertezas significativas associadas aos resultados obtidos, embora existam tendências claras sobre os cenários analisados, conforme já referido. O conjunto de incertezas está associado:

- aos cenários de emissões anuais de gases com efeito de estufa e aerossóis;
- à simulação do clima futuro por meio de cenários climáticos baseados em GCMs;
- aos cenários socioeconómicos futuros;
- à determinação dos impactes das alterações climáticas nos vários sectores socioeconómicos e sistemas biofísicos;
- à avaliação dos efeitos das medidas de adaptação aos impactos das alterações climáticas.

Na secção seguinte aprofunda-se os aspectos relativos aos recursos hídricos, com particular ênfase na componente qualidade das águas subterrâneas.

### **9.3 Impactes das alterações climáticas na qualidade das águas subterrâneas**

Os impactes das alterações climáticas nos recursos hídricos podem ser directos, quando resultam directamente das alterações climáticas, ou indirectos, quando resultam de modificações dos sistemas económico-social induzidas pelas alterações climáticas (Cunha *et al.*, 2006).

A análise da possível evolução da qualidade das águas subterrâneas está directamente ligada aos principais processos esperados para a evolução deste recurso do ponto de vista da quantidade, o que por sua vez está dependente da sua interligação com o escoamento superficial e com algumas variáveis do clima.

Embora a informação sobre a potencial evolução da qualidade das águas subterrâneas como resultado das alterações climáticas seja muito escassa, procurou-se, com base na análise de diversos estudos realizados à escala global (Gleick *et al.*, 2001; IPCC, 2007 e Bates *et al.*, 2008), em estudos regionais realizados em diversos países (cf. Secção 9.4 sobre projectos em curso) e nos resultados obtidos em diversos estudos para o País (Nascimento *et al.*, 2004; Nascimento *et al.*, 2005; Cunha *et al.*, 2006; Oliveira, Novo e Lobo Ferreira, 2007 e Novo, 2007) examinar os principais efeitos que seria expectável vir a observar para a componente da qualidade das águas subterrâneas face aos cenários esperados para o clima e os recursos hídricos *sensus lato*. Procurou-se apresentar uma síntese dessa análise através da Fig. 53 elaborada para este Programa.

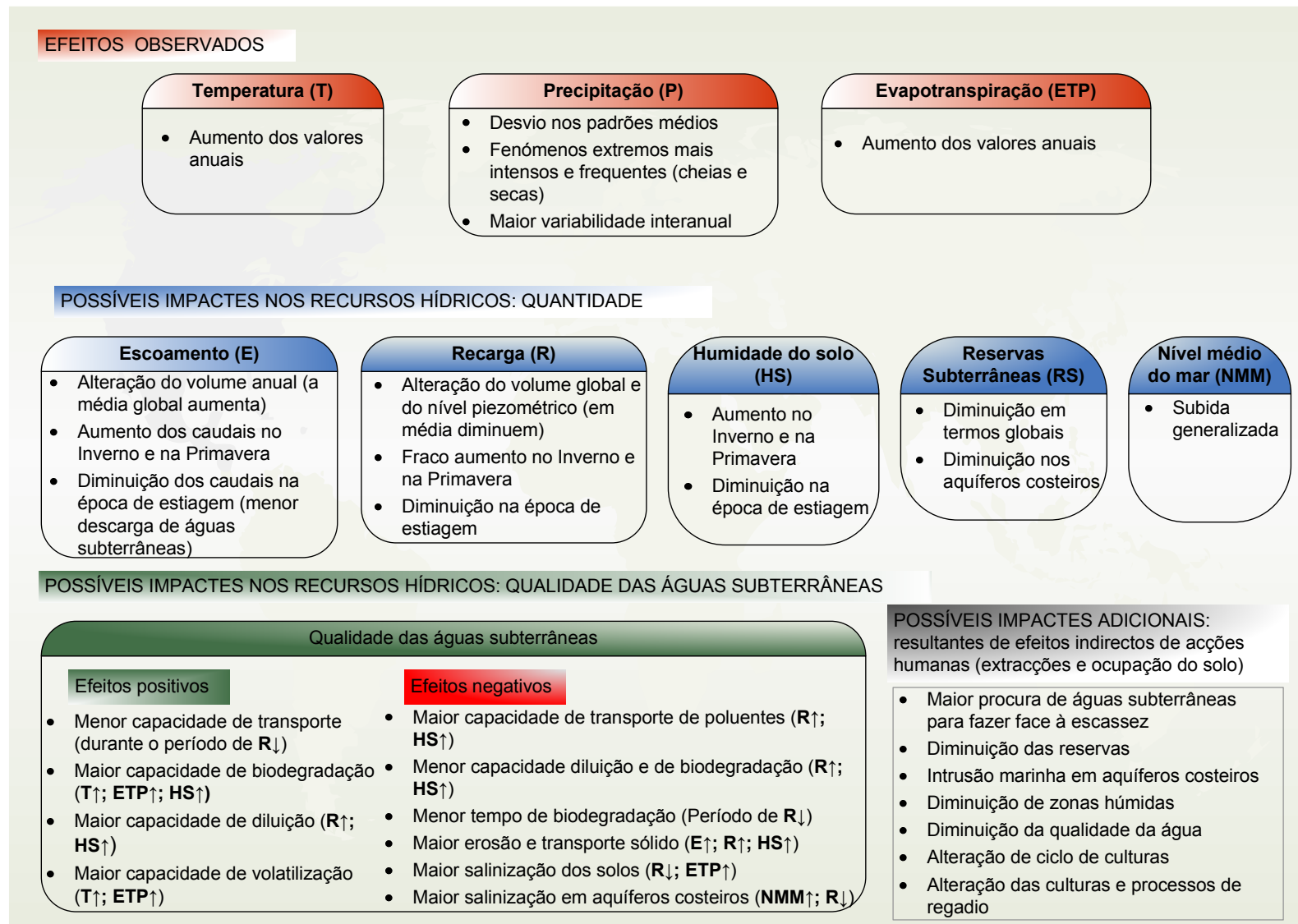


Fig. 53 - Síntese dos principais efeitos das alterações climáticas e seus possíveis impactes nos recursos hídricos

As potenciais implicações directas que as alterações climáticas terão na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos advêm das variações esperadas para o clima em termos de temperatura, de precipitação e de evapotranspiração (cf. Fig. 53). As alterações nestes factores provocarão, conforme referido na secção anterior, impactes a diversos níveis que se manifestam no regime de escoamento superficial, *i.e.* período e intensidade dos escoamentos, na recarga das águas subterrâneas, na humidade do solo e nas reservas, factores que, no seu conjunto, irão interferir com a capacidade da bacia hidrográfica para reter poluentes ou, pelo contrário, empolar diversas formas de poluição degradando a qualidade das águas subterrâneas (Gleick *et al.*, 2001).

As principais alterações em termos de quantidade de águas subterrâneas advêm de mudanças nos processos de recarga que conduzem a alterações da profundidade ao nível piezométrico e das interfaces águas superficiais – águas subterrâneas, com alteração dos caudais de descarga dos aquíferos para os rios (cf. Cunha *et al.*, 2006 e representação esquemática na Fig. 4 da pp. 29), bem como nas interfaces água doce – água salgada em aquíferos costeiros e zonas estuarinas. O aumento dos fenómenos extremos de precipitação, mesmo que para idênticos volumes anuais, pode causar o decréscimo da recarga de águas subterrâneas em virtude da capacidade de infiltração do solo ser excedida com mais frequência, favorecendo a escoamento superficial em detrimento da recarga (Bates *et al.*, 2008).

Para os quatro cenários de emissões analisados (ECHAM4, HadCM3, GCM RES A2 e GCM RES B2), existem diversos pontos do globo com elevada redução da recarga, onde se incluem os países mediterrânicos (cf. Bates *et al.*, 2008).

Em termos de qualidade de águas subterrâneas, o ligeiro aumento do escoamento superficial e da recarga e de humidade do solo, esperado para o período do Inverno e Primavera, podem ter como efeito negativo o incremento de transporte de poluentes resultante da maior capacidade erosiva e de transporte. Também o facto do nível piezométrico estar temporariamente mais próximo da superfície do solo favorece o transporte de nutrientes, carbono orgânico dissolvido, patogénicos, pesticidas e sais, entre outros elementos químicos resultantes da ocupação da bacia hidrográfica, para níveis mais profundos, elevando a concentração de poluentes na água e pondo em perigo a saúde humana e dos ecossistemas e a fiabilidade dos sistemas de distribuição de água. Contrariamente, maiores escoamentos superficiais e recarga em determinados períodos podem aumentar a capacidade de diluição de poluentes e contribuir para uma melhoria da qualidade das águas subterrâneas.

Por outro lado, se o aumento da recarga pode trazer benefícios e desvantagens para a qualidade das águas subterrâneas, também, a diminuição da recarga e da humidade do solo previstas para a época de estiagem o podem (cf. Fig. 53). Assim, por um lado a redução da recarga e da humidade do solo podem conduzir a efeitos negativos como a redução da capacidade de diluição de poluentes, da sua assimilação por parte do meio poroso envolvente

e da capacidade de biodegradação, bem como o aumento da salinização dos solos quer como resultado da elevada evapotranspiração em solos agrícolas, em especial em zonas áridas e semiáridas, quer como resultado da desestabilização do balanço hídrico em aquíferos costeiros. Há, contudo, um efeito positivo que poderá resultar da diminuição da recarga para períodos mais curtos e que se deve à menor capacidade e tempo de transporte de poluentes a partir da superfície permitindo, assim, mais tempo para degradação.

Além dos aspectos referidos, a subida do nível médio da água do mar aumentará as áreas expostas a processos de intrusão marinha em aquíferos costeiros, através do avanço da interface água doce - água salgada, podendo diminuir as reservas de água doce em zonas costeiras. Este processo poderá ser agravado no caso de haver diminuição da recarga e do volume de água extraída ser superior uma vez que estes dois processos conduzirão a um rebaixamento dos níveis piezométricos.

O efeito do aumento da temperatura e da evapotranspiração nem sempre conduz a resultados negativos. De facto, o seu aumento pode ter como consequência um incremento da capacidade de biodegradação e de volatilização de diversos poluentes, nomeadamente pesticidas, devido a temperaturas mais elevadas.

Em síntese, os impactes previstos em resultado de um clima mais seco revelam as seguintes alterações negativas prováveis, por vezes com efeitos antagónicos, com relação directa com a quantidade e qualidade das águas subterrâneas (Nascimento *et al.*, 2004, Nascimento *et al.*, 2005, Cunha *et al.*, 2006, Oliveira, Novo e Lobo Ferreira, 2007 e Novo, 2007):

- ◆ redução do volume de recarga de aquíferos como resultado de alterações no regime de precipitação e de evapotranspiração;
- ◆ rebaixamento dos níveis piezométricos, em especial nos aquíferos livres, causada pela redução da recarga e do aumento das taxas de evaporação;
- ◆ redução das áreas húmidas como resultado de alterações no regime de precipitação e de evapotranspiração e da diminuição da descarga de águas subterrâneas;
- ◆ aumento das áreas de aquíferos costeiros sujeitos a intrusão marinha causada pela subida do nível médio da água do mar;
- ◆ agravamento dos problemas de qualidade da água devido ao aumento de fenómenos de cheias e de erosão, nomeadamente de solos agrícolas poluídos, e à redução do escoamento nos meses de Verão;
- ◆ maior risco de salinização dos solos causado pelo aumento das necessidades de água para irrigação e pela evapotranspiração, com possibilidade de lixiviação posterior de sais para as águas subterrâneas.

Outros aspectos a ter em consideração para a questão da qualidade das águas subterrâneas são:

- ◆ maior capacidade de mobilização de poluentes em resultado dos níveis piezométricos estarem sazonalmente mais próximos da superfície;
- ◆ Verões mais secos podem conduzir a uma maior facilidade de formação de fissuras em zonas argilosas que podem servir de *by-pass* para entrada de poluentes nas águas subterrâneas nos períodos subsequentes de recarga (e.g. aquífero dos Barros de Beja);
- ◆ solos secos têm uma menor capacidade de biodegradação que solos húmidos.

Importa que todas estas questões sejam aprofundadas através de trabalhos específicos realizados para diferentes aquíferos do País. Os trabalhos realizados sobre a recarga de águas subterrâneas (Oliveira, Novo e Lobo Ferreira, 2007) demonstram a influência das séries de distribuição de precipitação na recarga de águas subterrâneas e a necessidade de recorrer a modelos de balanço sequencial diário que tenham em consideração a precipitação diária e a evapotranspiração bem como a área ocupada pela vegetação e as suas características. Os mesmos autores chegam à conclusão que, para os cenários analisados, para um valor de precipitação de 70% correspondente a 45% da recarga média calculada. Nascimento *et al.* (2005) chamam a atenção para o facto do aumento da intensidade da chuva nalguns meses do ano poder conduzir a um maior escoamento superficial em detrimento da recarga efectiva.

Desconhecem-se trabalhos realizados no País directamente sobre a temática das alterações climáticas e a qualidade das águas subterrâneas, exceptuando a questão da intrusão marinha.

#### **9.4 Principais conclusões de projectos neste domínio**

Em termos gerais, a natureza das águas subterrâneas, cuja dinâmica foi introduzida no Capítulo 3, torna-as menos vulneráveis que as águas superficiais a diferentes processos ou alterações relacionadas com o uso e a ocupação do solo ou a atmosfera, pelo que são menos susceptíveis a variações do clima ou a alterações climáticas. No caso de águas subterrâneas que sejam alimentadas, de forma natural ou induzida, por cursos de águas superficiais, os impactes sobre a qualidade dessas águas poderá afectar mais directamente a sua qualidade. Não obstante, uma vez afectados os recursos hídricos subterrâneos, o seu efeito será mais prolongado no tempo.

No contexto do exposto, a inércia dos sistemas aquíferos exprime-se numa lenta mudança, seja ela de quantidade, através da recarga, seja de qualidade com a introdução de poluentes. Nos diversos projectos em curso a seguir mencionados, o registo de mudanças na qualidade e quantidade de águas subterrâneas como resultado de modificações relacionadas com alterações climáticas ainda não foi claramente evidenciado. Há, sim, diversos estudos que projectam as principais alterações esperadas para cenários ao longo deste século.

Em diversos sistemas aquíferos em todo o mundo, os níveis piezométricos das águas subterrâneas têm vindo a decrescer como resultado de extracções superiores a recargas, sendo difícil avaliar se há algum decréscimo na recarga como consequência das alterações



climáticas.

Por outro lado, as elevadas pressões antropogénicas não relacionadas com as alterações climáticas são suficientemente elevadas para não permitir discernir com consistência efeitos isolados de alterações climáticas na qualidade das águas subterrâneas (Bates *et al.*, 2008).

Os efeitos indirectos causados pelas alterações climáticas relacionados com o aumento da temperatura e a diminuição da precipitação, com consequente escassez de água e aumento da evapotranspiração, deverão ter fortes repercussões na procura de águas subterrâneas para abastecimento e em resposta a um aumento das necessidades agrícolas para fazer face às novas condições de humidade dos solos.

Apresenta-se uma breve síntese de algumas das acções e/ou projectos desenvolvidos no domínio das alterações climáticas, com especial ênfase para aqueles que analisam o seu efeito no ciclo hidrológico, através da análise de cenários, impactes e medidas mitigadoras.

O **IPCC** (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) é uma organização científica intergovernamental sob os auspícios da Organização Mundial de Meteorologia e do Programa Ambiental da Nações Unidas (<http://www.ipcc.ch/about/index.htm>) que tem servido de enquadramento a inúmeros projectos sobre as alterações climáticas. Dada a sua relevância para o tema em análise, apresenta-se uma breve síntese dos seus objectivos, dos trabalhos desenvolvidos e dos relatórios publicados no contexto mais vasto de protocolos e de cimeiras internacionais havidas sobre as alterações climáticas.

Its constituency is made of:

- ◆ the governments: IPCC is open to all member countries of WMO (World Meteorological Organization) and UNEP (United Nations Environment Programme); governments can participate in plenary sessions of the IPCC where main decisions about the IPCC workprogramme are taken and reports are accepted, adopted and approved. They also participate the review of IPCC Reports;
- ◆ the scientists: hundreds of scientists all over the world contribute to the work of the IPCC as authors, contributors and reviewers;
- ◆ the people: as United Nations body, the IPCC work aims at the promotion of the United Nations human development goals.

The IPCC was established to provide the decision-makers and others interested in climate change with an objective source of information about climate change. The IPCC does not conduct any research nor does it monitor climate related data or parameters. Its role is to assess on a comprehensive, objective, open and transparent basis the latest scientific, technical and socio-economic literature produced worldwide relevant to the understanding of the risk of human-induced climate change, its observed and projected impacts and options for adaptation and mitigation.

The IPCC provides its reports at regular intervals and they immediately become standard works of reference, widely used by policymakers, experts and students. IPCC reports should be neutral with respect to policy, although they need to deal objectively with policy relevant scientific, technical and socio-economic factors. They should be of high scientific and technical standards, and aim to reflect a range of views, expertise and wide geographical coverage.

The findings of the first IPCC Assessment Report of 1990 played a decisive role in leading to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), which was opened for signature in the Rio de Janeiro Summit in 1992 and entered into force in 1994. It provides the overall policy framework for addressing the climate change issue. The IPCC Second Assessment Report of 1995 provided key input for the negotiations of the Kyoto Protocol in 1997 and the Third Assessment Report of 2001 as well as Special and Methodology Reports provided further information relevant for the development of the UNFCCC and the Kyoto Protocol. The fourth report was published in 2007.

Muitas das conclusões apresentadas no quarto relatório do IPCC são apresentadas ao longo deste capítulo.

**SIAM** (*Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*) - com o financiamento da Fundação Calouste Gulbenkian e da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, para a Fase I, e do Instituto do Ambiente, do Ministério das Cidades, do Ordenamento do Território e Ambiente, para a Fase II (1999-2006) (<http://www.siam.fc.ul.pt/siam.html>).

**Objectivos do projecto** - O Projecto SIAM I teve como objectivo primordial a realização da primeira avaliação integrada dos impactes e medidas de adaptação às alterações climáticas em Portugal Continental no século XXI. Foi a primeira avaliação realizada para um país do Sul da Europa.

Os estudos realizados basearam-se em cenários do clima futuro obtidos a partir de modelos de circulação geral da atmosfera, apresentados nos relatórios do IPCC, e incidiram sobre um conjunto de sectores socioeconómicos e sistemas biofísicos designadamente: recursos hídricos, zonas costeiras, agricultura, saúde humana, energia, florestas e biodiversidade e pescas. Foi também realizada uma análise sociológica sobre a problemática das alterações climáticas em Portugal.

Em Junho de 2002, foi editado o relatório final da primeira fase do Projecto, livro que envolveu 51 autores, provenientes de várias instituições e universidades (Santos, F.D., Forbes, K. e Moita, R., 2002).

A segunda fase do Projecto SIAM (SIAM II) iniciou-se em Janeiro de 2002. Esta segunda fase focou-se no estudo de caso do Estuário do Sado, tendo os estudos sido alargados às Regiões Autónomas da Madeira e dos Açores. O SIAM II incluiu ainda uma componente de *Outreach* que teve como objectivo a divulgação dos resultados obtidos no SIAM I aos diversos agentes interessados, obtendo ainda *inputs* para o SIAM II, através da organização de reuniões nas quais participaram as equipas dos sectores considerados relevantes para a região escolhida e os respectivos agentes interessados.

Em 2006, foi editado o livro "Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II", que contém os resultados do projecto SIAM (SIAM II) (Santos, F.D. e Miranda, P., 2006).

As simulações efectuadas para Portugal no âmbito do projecto SIAM tiveram por base modelos climáticos que simulam a resposta dos parâmetros climáticos a diferentes níveis de emissão de gases com efeito de estufa. Para a escolha destes modelos climáticos foram analisados os resultados de quatro modelos de circulação geral e dois modelos regionais. Os modelos HadCM3 e HadRM2, ambos concebidos pelo *Hadley Center for Climate Prediction and Research*, apresentaram melhores desempenhos na simulação das condições climáticas portuguesas e, por isso, foram os seleccionados pelo projecto para base da estimativa dos cenários climáticos e de escoamento futuros. Os cenários produzidos pelos modelos de circulação foram inseridos como dados de entrada num modelo hidrológico Temez para produzir cenários de escoamento. Na calibração do modelo foram usadas 35 bacias de Portugal Continental e foram simuladas as condições de escoamento para 2050 e para 2100 em 28 bacias representativas dos vários regimes existentes (Santos, Forbes e Moita, 2001; 2002).

As **principais conclusões deste projecto** no que diz respeito aos recursos hídricos para Portugal foram sintetizadas em Cunha *et al.* (2002; 2004), referindo-se haver incertezas associadas aos resultados obtidos, embora com tendências claras sobre:

- ◆ aumento generalizado da temperatura média anual em todo o País (cf. Fig. 51);
- ◆ ligeira variação da precipitação anual na região Norte do País e um decréscimo nas regiões Centro e Sul (cf. Fig. 52);
- ◆ aumento da sazonalidade da precipitação com decréscimos mais significativos no Verão do que no Inverno;
- ◆ progressiva redução do escoamento ao longo do século XXI com tendência para uma concentração do escoamento no Inverno;
- ◆ diminuição da recarga;
- ◆ rebaixamento dos níveis freáticos;
- ◆ diminuição da disponibilidade de água;
- ◆ aumento dos problemas de qualidade de água.

**WATCH** (*Water and Global Change*) - com o financiamento do 6.º Programa-Quadro da UE (2007-2009) (<http://www.eu-watch.org/nl/25222705-Home.html>).

**Objectivos do projecto** - This Integrated Project on global change (WATCH) will bring together the hydrological, water resources and climate communities to analyse, quantify and predict the components of the current and future global water cycles and related water resources states. It will evaluate their uncertainties and clarify the overall vulnerability of global water resources related to the main societal and economic sectors.

The objectives of this programme are:

- ◆ to integrate modelling of the water cycle into global and regional climate models;
- ◆ to better quantify possible changes in the water cycle due to human influences and climate change in the period 2000-2100 - esp. floods and droughts;
- ◆ to assess impacts of the changes on agriculture, industry, energy, drinking water supplies and the environment;
- ◆ to analyse and describe the current global water cycle;
- ◆ to evaluate how the global water cycle and its extremes respond to future drivers of global change;
- ◆ to evaluate feedbacks in the coupled system as they affect the global water cycle;
- ◆ to develop a modelling and data framework to assess the future vulnerability of water as a resource.

Os **resultados a alcançar** pelo projecto WATCH são:

- ◆ analyse and describe the current global water cycle, especially causal chains leading to observable changes in extremes (droughts and floods);
- ◆ evaluate how the global water cycle and its extremes respond to future drivers of global change (including greenhouse gas release and land cover change);
- ◆ evaluate feedbacks in the coupled system as they affect the global water cycle;
- ◆ evaluate the uncertainties in the predictions of coupled climate-hydrological- land-use models using a combination of model ensembles and observations;
- ◆ develop an enhanced (modelling) framework to assess the future vulnerability of water as a resource, and in relation to water/climate related vulnerabilities and risks of the major water related sectors, such as agriculture, nature and utilities (energy, industry and drinking water sector);
- ◆ provide comprehensive quantitative and qualitative assessments and predictions of the vulnerability of the water resources and water-/climate-related vulnerabilities and risks for the 21st century;
- ◆ collaborate intensively with the key leading research groups on water cycle and water resources in USA and Japan;
- ◆ collaborate intensively in dissemination of its scientific results with major research programmes worldwide (WCRP, IGBP);

- ◆ collaborate intensively in dissemination of its practical and applied results with major water resources and water management platforms and professional organisations worldwide (WWC, IWA) and at a scale of 5 selected river basins in Europe.

**GRAPHIC** - (*Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Change*) - com o financiamento da UNESCO IHP, IGRAC e do GWSP (2004-) (<http://www.chikyu.ac.jp/USE/GRAPHIC/GRAPHIC.htm>).

**Objectivos do projecto** formado por 10 instituições diferentes - This project will deal with groundwater resources assessment and future forecasting under the various pressures of humanity and climate changes. Groundwater is an extremely important natural resource as a primary source for agriculture, domestic and industrial water supplies in many countries. In order to maintain the sustainable uses of groundwater resources, evaluations of changes in not only groundwater storage but also groundwater fluxes (recharge rates and discharge rates) are necessary and extremely important.

The GRAPHIC project has identified the following problems and research needs related to groundwater recharge and discharge: 1) spatial and temporal scaling issues, 2) quantitative plant physiology and succession for environmental stress responses, 3) hydrological boundary conditions affecting recharge and discharge, 4) feedbacks associated with societal adjustments in land/water resource management, and 5) coupled atmospheric – hydrologic - oceanographic processes. Nutrient and material transports through groundwater recharge and discharge are the keys for groundwater quality. Reduction of available groundwater storage due to contamination and ecological impacts are keys of the GRAPHIC, as well as groundwater storage change due to vigorous human activities. Systematic analysis of stakeholders and groundwater-related policies is a crucial part of GRAPHIC.

Entre os **resultados a alcançar** encontram-se: a better understanding of the functioning and change of groundwater resources under the pressures of humanity and climate changes, and also scenarios and future developments for regional scales to the global groundwater assessment and synthesis effort.

Products will include: (1) database of the magnitude of changes in groundwater resources, (2) methodology for evaluating groundwater resources due to climate change and human impacts, (3) regional synthesis for evaluation in the global network, (4) protocols for integrated assessment, modeling and forecasting for dissemination in training workshops.

**AIACC - Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change. Project AF-47** (*Climate Change, Water and Agriculture in The Gambia and South Africa*) - com o financiamento da United Nations Environment Programme (UNEP) (2003-2006)

(<http://www.unepiso.org/AIACC/index.htm>).

**Objectivos do projecto** - The broad objective of AIACC Project AF-47 is to develop the capacity to estimate and compare the benefits and costs of projects in natural resource sectors that reduce the expected damages from climate change in Southern and West Africa. There are two parts in this project.

The first part consists of using well-established principles from economic benefit-cost analysis to develop a framework to estimate the economic benefits and costs associated with the expected climate change damages avoided by a development project that does not take climate change into account. Then, these benefits and costs can be compared to the case where planners incorporate expected climate change into the project assessment.

The second part consists of demonstrating this methodology in two project case studies, one in The Gambia and the other in South Africa.

The methodology developed to estimate the economic benefits and costs will be demonstrated in two project case studies:

- ◆ Berg River Basin Study (South Africa): an assessment of the benefits and costs of avoiding climate change damages for structural and non-structural water supply options in the Western Cape;
- ◆ The Gambia Drought Study (South Africa): an assessment of the benefits and costs of options for avoiding the damages caused by more frequent extreme droughts to poor farmers in the The Gambia.

**CECILIA** (*Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment*) com o financiamento do 6.º Programa-Quadro da UE (2006-2010) (<http://www.cecilia-eu.org/>).

Os **objectivos do projecto** desenvolvido por 16 instituições de 12 países europeus, onde não se inclui Portugal, são: to improve the understanding of local climate change in Central and Eastern Europe and its impacts into forestry, agriculture, hydrology and air quality.

Emphasis is given to applications of regional climate modelling studies at a resolution of 10 km for local impact studies in key sectors of the region. The project contains studies of hydrology, water quality, and water management (focusing at medium-sized river catchments and the Black Sea coast), air quality issues in urban areas (Black Triangle - a polluted region around the common borders of the Czech Republic, Poland and Germany), agriculture (crop yield, pests and diseases, carbon cycle), and forestry (management, carbon cycle).

Os **resultados do projecto** serão: to assess the impact of climate change at the regional to local scale for the territory of central and eastern Europe, with emphasis on using very high

climate resolution in order to capture the effects of the complex terrain of the region. From the viewpoint of climate scenario production, this goal will be achieved through a strategy of multiple and combined approaches, namely variable resolution models, RCMs and statistical downscaling methodologies. The primary tools, however, will be very high resolution RCMs run locally for targeted areas. From the impact viewpoint, the most important sectors for the economies and welfare of individual countries will be selected.

These objectives will be achieved through the execution of the following specific tasks:

- ◆ to collect, assess and make available for first local impact studies the scenarios and climate simulations produced in previous relevant projects, especially PRUDENCE, STARTDEX, MICE and ENSEMBLES, where available;
- ◆ to adapt and develop very high resolution RCMs for the region (10 km grid spacing) and perform regional time-slice nested simulations driven by ERA40 data and by GCMs for selected GHG change scenarios;
- ◆ to verify the model results, compare RCM and statistical downscaling results, analyze and develop the methods for verification, particularly at local scales;
- ◆ to estimate the effect of global climate change on the occurrence of extreme events (heavy precipitation, heat waves, droughts) in the region, including the assessment of the added value of high-resolution experiments for the simulation of the relevant processes and feedbacks;
- ◆ to evaluate uncertainties in regional climate change projections by intercomparing results obtained in previous projects (PRUDENCE, ENSEMBLES) and the present ones;
- ◆ to assess (based on the high resolution downscaling results) the impacts of climate change on the hydrological cycle and water resources over selected catchments in the region; to study the effects of climate change on the Black Sea;
- ◆ to study (based on the high resolution downscaling results) the impacts of climate change on agriculture and forestry, carbon cycle and selected species;
- ◆ to study (based on the high resolution downscaling results) the impacts of climate change on health and air quality (photochemistry of air pollution, aerosols.)

Além de alguns dos projectos referidos para a análise dos efeitos das alterações climáticas nos recursos hídricos, há um número de outros projectos que visam analisar alternativas para fazer face aos efeitos das alterações climáticas. Referem-se brevemente dois mais directamente ligados às águas subterrâneas.

**GABARDINE** (*Groundwater Artificial Recharge based on Alternative Sources of Water: Advanced Integrated Technologies and Management*), financiado pelo 6.º Programa-Quadro da UE (2005-2008) (<http://www.gabardine-fp6.org/>) e [http://www.Inec.pt/organizacao/dha/organization/dha/nas/estudos\\_id/gabardine](http://www.Inec.pt/organizacao/dha/organization/dha/nas/estudos_id/gabardine))

Os **objectivos deste projecto** que conta com a participação de 14 instituições de 9 países, incluindo o LNEC, são: to identify alternative sources of water to be artificially recharged and to investigate the environmental, social and economic feasibility of their utilization. The alternative water sources are surface water surpluses generated during rainy seasons, treated effluent, surpluses of desalinated water, that are expected in periods of low water demand or high water availability (from natural resources).

The project addresses all issues related to the problem: climate change and expected precipitation rates, aquifer recharge and water budgets, identification of potential alternative water sources and technologies for their utilization, aquifer vulnerability, impact of the unsaturated underground, development of tools for water resources management and decision support.

Entre os **resultados a alcançar** encontram-se:

- explore the viability of supplementing existing water resources in semi-arid areas with alternative sources of water that could be exploited in the context of an integrated water resources management approach;
- investigate the feasibility of using aquifers as the primal facility for the large scale storage of these alternatives water sources and investigate techniques for their artificial recharge and injection of the produced alternative water, including a monitoring of water quality and purification by natural attenuation and filtration processes;
- evaluate and quantify the potential impact of degrading factors, such as climate change, changes in the quality of water, salt water etc. on the global quality and usability of the resource, by developing tools for risk mapping, for modeling and for monitoring, and to propose measures for preventing or minimizing, and mitigating their impact.

Four test sites have been selected, each representing a different aspect of the problem:

- the lower valley of the Llobregat river in Spain, where the objective is to mitigate the aquifer from seawater intrusion by means of artificial recharge of effluent and or runoff water;
- the Campina de Faro aquifer in Portugal, where the objective is achieving groundwater quality improvement by injecting surplus of runoff-water;
- the coastal aquifer shared by Israel and Palestine (Gaza). In Israel most of the recharge technologies are implemented but the quality and mixing aspects need to be investigated and quantified. The Coastal aquifer of Gaza suffers from huge hydrologic deficits and is probably the most affected site, suffering from the most acute problems;
- a small part of the aquifer of Thessaloniki watershed basin (Greece) and especially in Sindos industrial area, in which the artificial recharge method is selected for control of the groundwater quality, mainly deteriorated from a high TDS content, due to the presence of salts in the subsurface layers.



**RECLAIM WATER** (*Water Reclamation Technologies for Safe Artificial Groundwater Recharge*) financiado pelo 6.º Programa-Quadro da UE (2005-2008) (<http://www.reclaim-water.org/>).

Os **objectivos deste projecto** que conta com a participação de 19 instituições, não incluindo Portugal são: the investigation of water reclamation technologies and their impact on key contaminants. The project aims to provide new combinations of technologies to treat wastewater to appropriate water quality levels for sustainable groundwater recharge. RECLAIM WATER in its scope concentrates upon different issues following the water cycle in a water reclamation and aquifer recharge process:

- ◆ improvement of municipal wastewater treatment processes as an important prerequisite for water reclamation;
- ◆ optimised water reclamation technologies to produce feed water for aquifer recharge;
- ◆ design and operation of actual recharge systems (e.g. infiltration-percolation systems, constructed wetlands, lagoons, well injection);
- ◆ the investigation of processes in the unsaturated soil zone and their dependence on the pre-treatment (steps 2 and 3);
- ◆ the investigation and modelling of the introduction of a wastewater phase in a natural aquifer using tracer compounds (like Boron);
- ◆ anticipating the needs of various uses of recovered water (e.g. indirect potable use and non-potable uses) in terms of water quality requirements and definition of relevant target contaminants;
- ◆ developing (if necessary) and applying the necessary analytical tools to monitor the relevant contaminants (microbial and chemical) including the investigation of contaminant fate in the processes;
- ◆ collecting existing data on the behaviour of the target compounds and the impact of treatment options in case studies to provide a sound basis for human health environmental risk assessment.

Os **resultados a alcançar** com este projecto são: to provide effective technologies to monitor and mitigate emerging risks posed by chemical contaminants and pathogens in reclaimed wastewater streams used for groundwater recharge. It will integrate technological water reclamation solutions with natural attenuation processes occurring in the subsurface to achieve upgraded water quality assessed on the basis of key contaminants. The project will directly relate the knowledge obtained on new treatment processes and contaminant behaviour to the question of risk associated to the indicated use. The risk studies cover water intake, treatment, storage and distribution steps, analytical tools, monitoring and control systems, and operational procedures as well as communication procedures.

## 9.5 Necessidades de investigação

Existem múltiplas lacunas de conhecimento em termos de dados e de necessidades de investigação no domínio do efeito das alterações climáticas nos recursos hídricos. A informação de base e o acesso a ela são condição necessária para uma gestão adaptativa, embora em muitos casos essas redes sejam insuficientes em termos de dados espacial e temporalmente representativos.

Importa melhorar o conhecimento em relação aos modelos de alterações climáticas e as suas relações com o ciclo hidrológico para escalas que sejam relevantes aos decisores. Por outro lado, os aspectos das alterações climáticas e seus efeitos nos recursos hídricos relativamente à qualidade das águas, aos ecossistemas aquáticos e às águas subterrâneas encontram-se insuficientemente estudados a nível global e também em Portugal. Um outro aspecto crucial prende-se com a questão da integração de todos os aspectos referidos, designadamente com a dimensão socioeconómica, que peca pela ausência de instrumentos integradores e facilitadores de troca de informação entre sectores inter-relacionados e interdependentes que no seu conjunto permitam uma melhor adaptação e mitigação de efeitos.

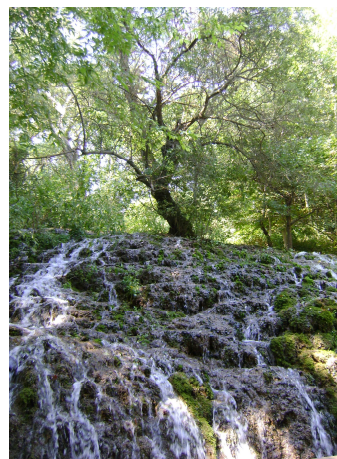
O domínio das águas subterrâneas, apesar da sua comprovada importância, têm recebido pouca atenção na análise dos efeitos das alterações climáticas quando comparadas com as águas superficiais (Bates *et al.*, 2008). É necessária mais informação de base sobre a qualidade e quantidade da água, e o seu uso de forma a conhecer melhor os processos de recarga e de balanço hídrico.

O uso conjunto de águas subterrâneas e superficiais para satisfazer a procura de água tem sido frequentemente referido como uma solução para fazer face a um abastecimento contínuo. Um dos aspectos fulcrais a considerar para a sustentabilidade desta medida é a utilização de recarga artificial de aquíferos nas alturas em que há excedente de águas superficiais, por exemplo as cheias cuja recorrência se prevê venha a ser ainda maior em Portugal, ou outras fontes alternativas. Esta temática tem vindo a ser abordada em Portugal através dos projectos Gabardine (cf. [http://www.lnec.pt/organizacao/dha/organization/dha/nas/estudos\\_id/gabardine](http://www.lnec.pt/organizacao/dha/organization/dha/nas/estudos_id/gabardine)) e do projecto ASEM (cf. [http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nas/estudos\\_id/ asemwaternet](http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nas/estudos_id/ asemwaternet), Oliveira 2007 e Oliveira, Novo e Lobo Ferreira, 2007), ambos desenvolvidos no LNEC, e para casos de estudo no Algarve. A questão da utilização da zona vadosa para melhoria das águas em bacias de infiltração, evitando a recarga directa em furos, é um aspecto de grande interesse visando a melhoria da água infiltrada relativamente a um conjunto de potenciais contaminantes emergentes habitualmente não tratados, como o caso de disruptores endócrinos (e.g. pílula).

Atendendo à informação existente sobre a qualidade das águas subterrâneas em Portugal, quer para períodos de seca quer para períodos de cheia, cuja ocorrência é aleatória mas

recorrente com vários episódios por década, importa efectuar a sua análise visando estudar eventuais tendências de qualidade observadas para diferentes períodos, incluindo sistemas com diferentes características de permeabilidade e de vulnerabilidade e sujeitos a condições climáticas diferentes. Essa análise poderá constituir um ponto de partida para o estudo dos efeitos das alterações climáticas na qualidade dos recursos hídricos permitindo, eventualmente, extrapolar ou determinar uma metodologia adequada para simular o efeito dos cenários previstos na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. No Capítulo 10 propõe-se um Programa de Estudo nesse sentido.





## 10 PROGRAMA DE ESTUDOS

---

### 10.1 Introdução

A preservação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos foi a temática seleccionada para este Programa de Investigação e de Pós-graduação intitulado **Gestão integrada e sustentável da qualidade das águas subterrâneas em Portugal: contributos para um Bom estado em 2015**.

Na sequência da apresentação efectuada no Capítulo 1 sobre os grandes desafios que se colocam à gestão integrada e sustentável da água no século XXI, da análise das exigências impostas pelo actual quadro legislativo, apresentada no Capítulo 2, dos conceitos teóricos subjacentes a uma gestão integrada de águas subterrâneas, apresentada no Capítulo 3, e da análise das características e do estado dos recursos hídricos subterrâneos de Portugal, cf. Capítulo 4, seleccionaram-se três vertentes estratégicas para reflexão e aprofundamento em relação à temática qualidade dos recursos hídricos subterrâneos, selecção essa que resulta das forças motrizes que, a nosso ver, causam as principais pressões sobre este recurso:

- ◆ actividades potencialmente poluidoras (por ordem de análise no texto): agricultura, golfe, estradas, aeroportos e lixeiras;
- ◆ pressões causadas por catástrofes 'naturais', como o caso dos fogos florestais;
- ◆ mudanças impostas pelas alterações climáticas.

Nos Capítulos 5 a 9 analisa-se o estado da arte nestes diferentes domínios, a respectiva situação em Portugal, identificam-se os potenciais aspectos de causa - efeito dessas pressões e seus potenciais impactes nas massas de água, apresentam-se as principais conclusões de projectos da UE e outros projectos internacionais e, por fim, analisam-se as principais

necessidades de investigação em cada domínio identificando as prioridades de investigação.

A Fig. 54 representa de uma forma esquemática as forças motrizes e as pressões referidas e que foram alvo de análise ao longo deste programa (assinalados a vermelho). As metodologias e ferramentas horizontais a utilizar nos Programas de Estudos e de Pós-graduação encontram-se assinaladas a verde na mesma figura. Optou-se por estruturar os Programas de Estudos e de Pós-graduação utilizando a conceptualização DPSIR, sigla que designa a sequência **D**iving **F**orce (Força Motriz) - **P**ressure (Pressão) - **S**tate (Estado) - **I**mpact (Impacte) - **R**esponse (Resposta) (cf. Secção 3.5 e Fig. 8). Trata-se de um modelo conceptual cujo objectivo é descrever as interacções entre a sociedade e o ambiente ao permitir descrever as relações entre as origens, as consequências e as respostas para os problemas ambientais, facilitando a sua interligação.

O Programa de Estudos que se apresenta neste Capítulo 10 emerge do amadurecimento dos temas dissecados ao longo dos nove primeiros capítulos, onde se identificam os principais problemas de poluição de águas subterrâneas em Portugal e se analisam as suas origens e potenciais efeitos na qualidade das águas e de onde ressaltam as principais lacunas de informação e se identificam prioridades para investigação e desenvolvimento nos diferentes domínios.

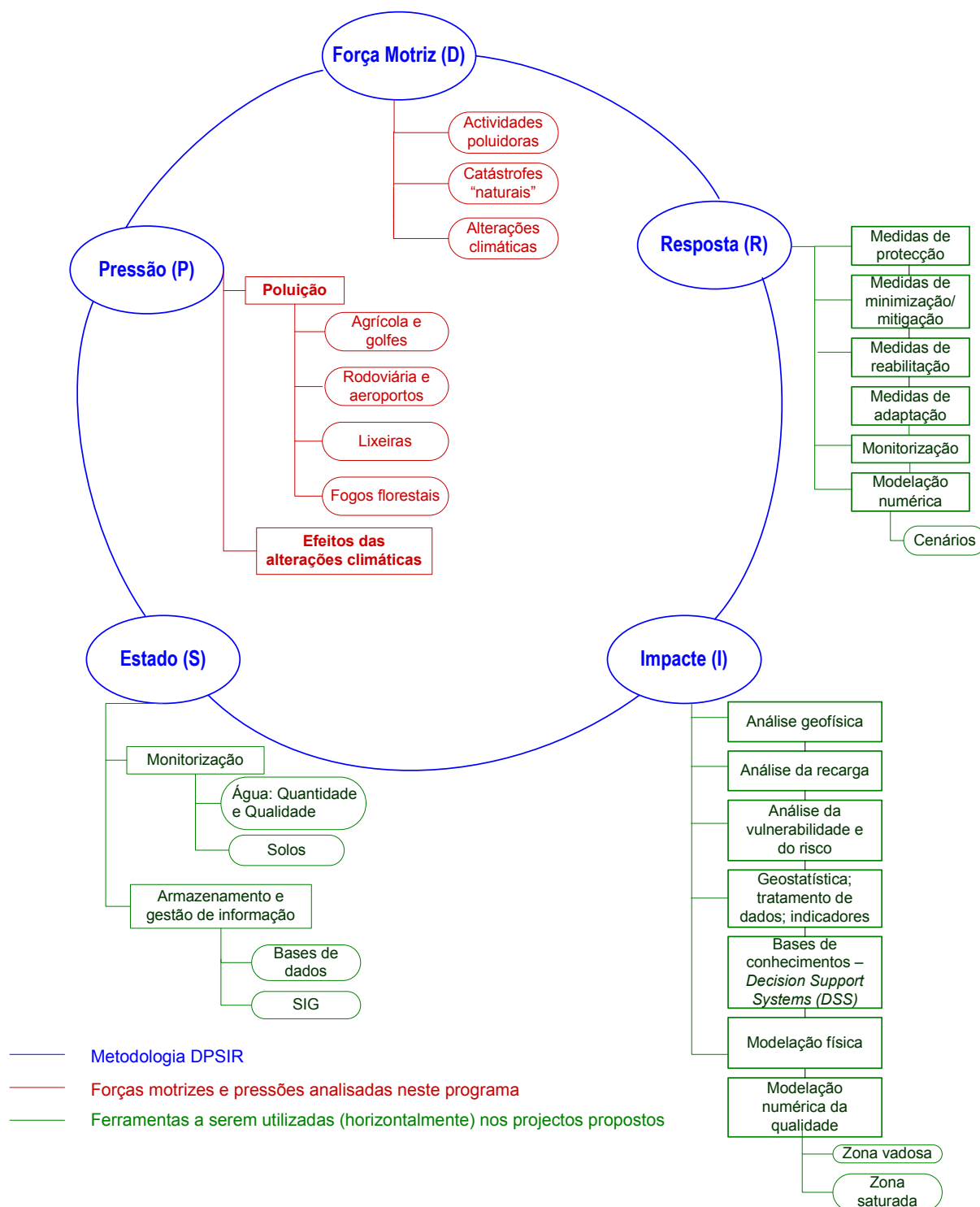


Fig. 54 - Representação esquemática das forças motrizes e pressões analisadas (a vermelho) e das ferramentas horizontais a utilizar nos Programas de Estudos e de Pós-graduação (a verde)

O objectivo do Programa de Estudos é propor um conjunto de linhas de investigação e de desenvolvimento que contribua para proteger, melhorar e reabilitar a qualidade das massas de águas subterrâneas das principais origens de contaminação e de deterioração a que estão, ou possam vir a estar, sujeitas. As principais linhas de força dos programas visam contribuir com

respostas que permitam assegurar a redução global da poluição e/ou a manutenção da qualidade das águas, tendo em vista alcançar um Bom estado das águas subterrâneas (químico e quantitativo) em 2015.

Procura-se, simultaneamente, que os aspectos de preservação da qualidade estejam ligados à gestão integrada e sustentável do recurso do ponto de vista quantitativo, propondo formas de gestão interanual mais adequadas ao clima do País, com secas e cheias aleatórias mas recorrentes, através do uso da recarga artificial em períodos de abundância para posterior uso em épocas de escassez, apontando também formas de utilização de origens de água alternativas para a recarga.

O exercício prospectivo que se apresenta é efectuado à luz dos conceitos de gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos ao nível da região hidrográfica como unidade principal de planeamento das águas, tal como preconizado no art. 29.º da Lei da Água sobre os Planos de Gestão de Região Hidrográfica (PGRH). Os PGRH pretendem constituir-se como a base de suporte à gestão, à protecção e à valorização ambiental, social e económica das águas. Irão incluir, entre outros aspectos de interesse para as águas subterrâneas: uma descrição geral da região hidrográfica; uma caracterização das águas subterrâneas existentes na região hidrográfica, incluindo a identificação dos recursos, a delimitação das massas de águas subterrâneas e a determinação das condições de referência; uma caracterização das pressões naturais e incidências relacionadas com a actividade humana significativas e **um programa de medidas que garanta a prossecução dos objectivos ambientais estabelecidos na Lei da Água**, designadamente o balanço entre as potencialidades, as disponibilidades e as necessidades, bem como a boa qualidade das águas subterrâneas.

Com este Programa procura-se: (1) seguir a estratégia e rumo de actuação do Núcleo de Águas Subterrâneas (NAS), (2) procurando actualizá-los face às novas exigências impostas pela legislação mais recente, ir ao encontro das respostas necessárias às mudanças ambientais em curso (e.g. alterações climáticas) e (3) enquadrando-os nas grandes linhas temáticas e de financiamento dos programas da União Europeia em matéria de I&D (7.º Programa-Quadro) para o período 2007-2013.

A **estratégia de actuação do NAS** vem sendo espelhada nas dissertações de mestrado, nas teses de doutoramento e nos diversos projectos nacionais e internacionais desenvolvidos no âmbito de: modelação matemática; reabilitação de aquíferos; recarga; recarga artificial; perímetros de protecção, alterações climáticas, entre outros. A Fig. 54 apresenta, assinalado a verde, uma síntese desse conjunto de ferramentas horizontais que serão utilizados e desenvolvidos nos Programas de Estudos e de Pós-graduação propostos, instrumentos em contínuo aperfeiçoamento e melhoria.

Em termos das **exigências impostas pela legislação** mais recente, os programas foram estruturados e orientados de molde a contribuir para dar respostas ao preconizado em dois



elementos fundamentais da legislação sobre recursos hídricos, a Directiva das Águas Subterrâneas e a Directiva-Quadro da Água, em termos de medidas para evitar, limitar e controlar a contaminação de águas subterrâneas. Além de considerar estes importantes instrumentos legais, uma grande diversidade de outros diplomas que estabelecem procedimentos e metas a atingir, descritos no Capítulo 2, foram tidos em conta para a estratégia de prioridades de investigação adoptada.

Relativamente às grandes **linhas temáticas e de financiamento dos programas da União Europeia em matéria de I&D** procurou-se que os programas fossem ao encontro das necessidades nacionais mas que, simultaneamente, atendessem ao contexto das principais prioridades internacionais, designadamente aos objectivos e políticas definidos como tópicos para investigação no âmbito do 7.º Programa-Quadro da UE<sup>4</sup>. Há, assim, programas cuja actuação é essencialmente nacional, aspecto que vem repercutido nas entidades financiadoras e, em parte também, nos parceiros, e outros que são de índole mais internacional pelo que se prevê um financiamento para a investigação através do 7.º Programa-Quadro da UE, para áreas específicas referidas no desenvolvimento de cada programa.

O Quadro 25 apresenta uma síntese das áreas do Tema 6 – Ambiente (incluindo alterações climáticas) com interesse para o Núcleo de Águas Subterrâneas e as áreas onde foram elaborados programas. Os objectivos específicos de cada uma das áreas são apresentados mais tarde, aquando da descrição do seu enquadramento no âmbito de cada programa.

---

<sup>4</sup> Objectivos do Tema 6: Ambiente (incluindo alterações climáticas): To promote sustainable management of the natural and human environment and its resources by advancing our knowledge on the interactions between the biosphere, ecosystems and human activities, and developing new technologies, tools and services, in order to address in an integrated way global environmental issues. Emphasis will be put on prediction of climate, ecological, earth and ocean systems changes, on tools and on technologies for monitoring, prevention and mitigation of environmental pressures and risks including on health and for the sustainability of the natural and man-made environment.

Quadro 25 - Áreas de interesse do NAS no âmbito do 7.º Programa-Quadro da UE, Tema 6 – "Ambiente (incluindo alterações climáticas)" e sua ligação aos Programas de Estudos propostos

<b>Activity 6.1 Climate Change, pollution and risks</b>		
<u>Sub-Activity 6.1.1 Pressures on environment and climate</u>	Área geral de interesse NAS	Projectos propostos
<i>Area 6.1.1.5 Climate change natural and socio-economic impacts</i>	X	-
<i>Area 6.1.1.6 Response strategies: adaptation, mitigation and policies</i>	X	<b>P7</b>
<b>Sub-Activity 6.1.3 Natural Hazards</b>		
<i>Area 6.1.3.1 Hazard assessment, triggering factors and forecasting</i>	X	<b>P6</b>
<b>Activity 6.2 Sustainable management of resources</b>		
<u>Sub-Activity 6.2.1 Conservation and sustainable management of natural and man-made resources and biodiversity</u>		
<i>Area 6.2.1.1 Integrated resource management</i>	X	não abre em 2009
<i>Area 6.2.1.2 Water resources</i>	X	<b>P2 e P8</b>
<b>Activity 6.3 Environmental technologies</b>		
<u>Sub-Activity 6.3.1 Environmental technologies for observation, simulation, prevention, mitigation, adaptation, remediation</u>		
<i>Area 6.3.1.1 Water (Nota: em 2009 só water supply and sanitation)</i>	X	-
<b>Activity 6.4 Earth observation and assessment tools for sustainable development</b>		
<u>Sub-Activity 6.4.2 Forecasting methods and assessment tools for sustainable development taking into account differing</u>		
<i>Area 6.4.2.1 Tools for impact assessment</i>	X	-
<i>Area 6.4.2.2 Sustainable development indicators</i>	X	não abre em 2009

Os programas propostos visam colmatar as necessidades de investigação referidas em detalhe na última secção de cada temática de estudo, pelo que farão naturalmente parte integrante do próximo Plano de Investigação Programada quadrienal (PIP 2009-2012) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

## 10.2 Concepção do Programa de Estudos

Os oito programas que se propõem resultam da análise efectuada sobre as principais forças motrizes e pressões exercidas sobre a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos e que foram, ao longo do documento (cf. Capítulo 5 a 9), identificadas como prioridades de investigação e de actuação tendo em vista contribuir para o Bom estado da qualidade das águas subterrâneas em 2015 através da sua gestão integrada e sustentável ao nível da bacia hidrográfica.

A Fig. 55 apresenta de forma esquemática o conjunto de programas propostos e a sua interligação ao conjunto de três grupos de pressões identificados nas secções anteriores. As actividades potencialmente poluidoras incluem cinco programas, dois na área de poluição agrícola e golfes, dois na área de poluição rodoviária e aeroportos e um na poluição de lixeiras. Na temática que se optou por designar por catástrofes 'naturais' é proposto o sexto programa. Finalmente, os impactes das alterações climáticas e o estudo de medidas de minimização e de adaptação são tema para os dois últimos programas.

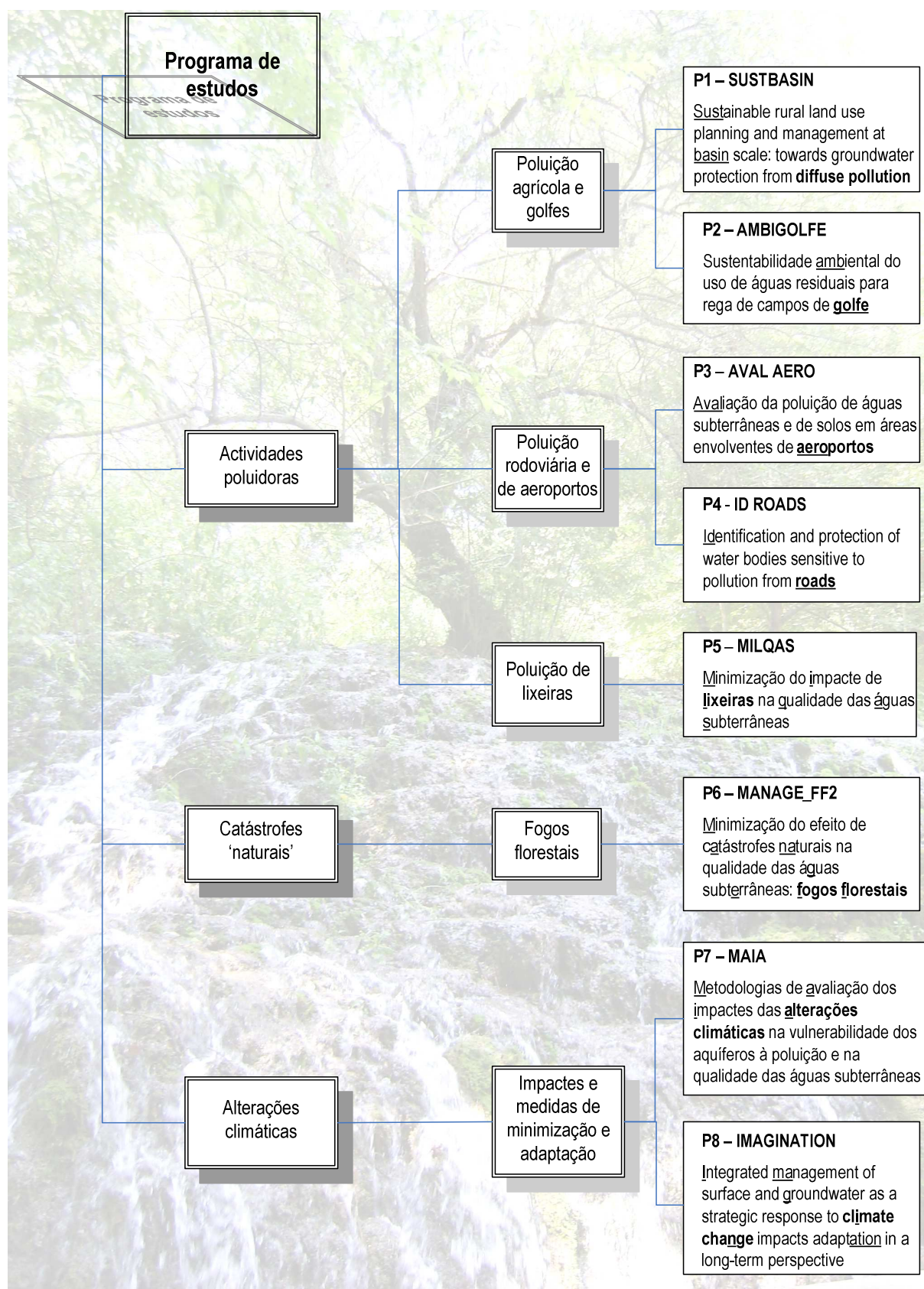


Fig. 55 - Organograma dos Programas de Estudos propostos (nota: a sublinhado estão as letras que deram origem ao acrónimo e a **negrito** está a pressão analisada no programa)

O Quadro 26 apresenta uma listagem dos programas propostos e das principais características perspectivadas para cada um deles em termos de: (1) âmbito: projecto nacional, Europeu ou internacional; e tipo: *collaborative project*, *demonstration project* ou *coordination action*; (2) parceiros: principais entidades portuguesas e estrangeiras que se prevê possam colaborar na elaboração dos programas; (3) actores (*stake-holders*): principais actores portugueses interessados nos resultados dos programas e (4) entidades financiadoras: conjunto de entidades interessadas e que poderão vir a contribuir para o financiamento dos programas. No caso de financiamento através do 7.º Programa-Quadro, aparece referido no Quadro 26 o número da área em que se insere.

Os programas foram definidos para um horizonte de cerca de 8 anos, pelo que serão em parte integrados nos projectos a apresentar pelo Núcleo de Águas Subterrâneas para o próximo Plano de Investigação Programada quadrienal (PIP 2009-2012) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, com início em 2009. A duração média de cada programa é geralmente de três anos, embora possa ter apenas dois. Os cronogramas apresentados têm início indicativamente em 2009, embora seja a sua duração que interessa reter.

### 10.3 Estimativa de custos

A estimativa de custos apresentada para os diferentes programas considera que:

- ◆ Os custos da actividade do pessoal do LNEC (B) (cf. por exemplo **Error! Reference source not found.**, pp. **Error! Bookmark not defined.**) são definidos com base nas tabelas de imputação de mão-de-obra para as diferentes categorias profissionais actualmente em vigor no LNEC, descritas nas Instruções n.º 963, de 31 de Março de 2008. Os custos de pessoal são afectados por um factor multiplicativo de dois, que se destina a ter em conta os encargos associados não contabilizados directamente, como os custos administrativos, de acordo com as referidas Instruções.
- ◆ Os custos correspondentes a aquisições de serviços, a equipamento, a consultores, a missões e a deslocações (A) (cf. por exemplo **Error! Reference source not found.**, pp. **Error! Bookmark not defined.**) foram afectados por um coeficiente multiplicativo de 1,2, de acordo com as Instruções já referidas, para incluírem os restantes encargos associados, nomeadamente os relacionados com as tarefas administrativas.
- ◆ Os custos relativos à actividade de bolseiros, estudantes de mestrado ou de doutoramento foram calculados com base no Regulamento das Bolsas LNEC de Investigação Científica (Aviso n.º 3089/2004, 2.ª série), *i.e.* 1 610 € para bolsas de doutoramento e 1 220 € para bolsas de mestrado.

Quadro 26 - Listagem dos Programas de Estudos propostos e principais características perspectivadas

P	Designação abreviada	Designação	Tipo de projecto	Parceiros (ver lista de simbologia na pp. XVIII)	Actores	Entidades financiadoras
P1	<b>SUSTBASIN</b>	<u>Sustainable rural land use planning and management at <b>basin</b> scale: towards groundwater protection from <b>diffuse pollution</b></u>	I & D Internacional;  <i>Collaborative project</i>	COTR, IDRHa, UC BRGM, GEUS, CWRC, IET, IMECH	COTR IDRHa ARHs	7.º PQ da UE (6.2.1.2) IDRHa PIP/LNEC FCT (só bolsa)
P2	<b>AMBIGOLFE</b>	Sustentabilidade <u>ambiental</u> do uso de águas residuais para rega de campos de <u>golfe</u>	I & D Nacional	UAig EAN UM (NES/LNEC)	FPG ARHAig INAG	FCT PIP/LNEC
P3	<b>AVAL AERO</b>	<u>Avaliação</u> da poluição de águas subterrâneas e de solos em áreas envolventes de <u>aeroportos</u>	I & D Nacional	CMPV LCPC (NRE/DHA) (NGEA/DG)	NAER CMPV INAC INAG	CMPV NAER FCT PIP/LNEC
P4	<b>ID ROADS</b>	<u>Identification and protection of water bodies sensitive to pollution from <b>roads</b></u>	I & D Internacional;  <i>Coordination action</i>	GeoZS, NIVA, VTI, LCPC, UG, UN, (NRE/DHA), (DT)	EP INAG	7.º PQ da UE (7) PIP/LNEC FCT (só bolsa)
P5	<b>MILQAS</b>	<u>Minimização do impacto de <b>lixeiros</b> na qualidade das águas subterrâneas</u>	I & D Nacional	INR (NGEA/DG)	INR IRAR INAG ARHs	INR, IRAR FCT PIP/LNEC
P6	<b>MANAGE_FF2</b>	<u>Minimização do efeito de <b>catástrofes naturais</b> na qualidade das águas subterrâneas: <b>fogos florestais</b></u>	I & D UE mediterrâneo;  Interreg IVB project	UPC UOC BRGM IHS INRGREF	DGRF Interreg	IV da UE PIP/LNEC
P7	<b>MAIA</b>	<u>Metodologias de <b>avaliação</b> dos <b>impactes</b> das <b>alterações climáticas</b> na vulnerabilidade dos aquíferos à poluição e na qualidade das águas subterrâneas</u>	I & D Internacional;  <i>Collaborative project</i>	BRGM UPC IGE INRGREF	IPPC INAG ARHs IRAR	7.º PQ da UE (6.1.1.6.1) PIP/LNEC FCT (só bolsa)
P8	<b>IMAGINATION</b>	<u>Integrated <b>management</b> of surface and groundwater as a strategic response to <b>climate change</b> impacts <b>adaptation</b> in a long-term perspective</u>	I & D Internacional;  <i>Demonstration project</i>	UG SWRRC INRGREF UPC	ARHAig INAG IRAR	7.º PQ da UE (6.2.1.2.1) PIP/LNEC

**Programa de Estudo 1 – SUSTBASIN**  
**Domínio de aplicação: Internacional**  
**Tipo de Projecto: *Collaborative project* do 7.º PQ da UE**

---

## **10.4 SUSTainable rural land use planning and management at BASIN scale: towards water protection**

### **10.4.1 Enquadramento e justificação**

O sector agrícola constitui um pilar fundamental da economia mundial, representando as áreas ocupadas pela agricultura e pela silvicultura, elevadas percentagens da área total dos territórios. Esta posição destacada em termos de ocupação e de uso do solo é também válida no que se refere aos consumos de água, uma vez que a agricultura é o principal utilizador deste recurso na maioria dos países (em Portugal representa 81,7% do consumo total, dos quais 64% tem origem subterrânea, cf. Quadro 9 da Secção 4.1).

No contexto do maior utilizador da água, este sector económico tem fortes responsabilidades em termos da preservação da qualidade da água, aspectos que dependem da extensão da ocupação do solo, do respectivo coberto vegetal, dos fertilizantes e pesticidas aplicados, das condições geomorfológicas, do tipo de solo e das condições climáticas, temática que foi analisada ao longo do Capítulo 5.

A ocupação do solo agrícola, em muitas situações localizada em áreas de infiltração máxima onde se processa a recarga principal dos aquíferos, aliada a deficientes práticas agrícolas, com excesso de irrigação e de fertilização, tem como consequência o aparecimento de valores de nitratos e de pesticidas acima dos valores limite (e.g. cerca de 1/3 das massas de águas subterrâneas da Europa excedem o limite de 50 mg/l de nitratos (cf. EEA, 2000, in Quevauviller, 2005)).

A complexidade dos sistemas solo e água, e as suas reacções com efeitos a longo prazo, requer que seja adoptada uma gestão pró-activa com base no conhecimento do sistema natural bem como na análise socioeconómica que as várias opções de uso do solo e dos recursos hídricos podem ter. Solos com características diferentes reagem de diferente forma a processos semelhantes de contaminação, não só como resultado de uma diferente dinâmica de movimento do fluxo mas também porque dependem da existência de determinados componentes reactivos aí presentes. A forma adequada de monitorização, em termos de

escala espacial e temporal, dos diferentes parâmetros que podem ser relevantes para os processos de lixiviação dificilmente é a mais adequada para todos os parâmetros em simultâneo.

O uso e ocupação dos solos são, por isso, um elemento-chave da preservação da qualidade da água subterrânea, de superfície e, em última análise, da qualidade da água para consumo humano e para os ecossistemas. Esta visão holística e integrada dos subsistemas solos e água, no contexto do planeamento e da gestão a nível da bacia hidrográfica, é fundamental para a prevenção e controlo da contaminação e para mitigar os impactes da contaminação nos ecossistemas associados, a diferentes escalas.

No contexto do exposto, e das necessidades de investigação identificadas na Secção 5.7, este programa propõe-se contribuir para melhorar o uso e ocupação do solo agrícola através de uma visão holística e integrada dos subsistemas solos e água, no contexto do planeamento e da gestão a nível da bacia hidrográfica, visando para a prevenção e controlo da contaminação de forma a assegurar a protecção dos recursos hídricos de jusante e os ecossistemas associados, a diferentes escalas.

O programa dá continuidade a um projecto para a Fundação para a Ciência e Tecnologia, em curso entre 2005 e 2008, intitulado "Metodologias para um melhor planeamento e gestão do uso do solo agrícola atendendo à vulnerabilidade dos aquíferos à poluição difusa em curso neste domínio" e ao projecto AGRO 727, decorrido entre 2005 e 2007, intitulado "Demonstração e divulgação de técnicas de gestão integrada de salinidade em solos regáveis do Alentejo". Pretende-se melhorar as ferramentas em uso para esse estudo, analisar a componente de contaminação relativa aos pesticidas [integrando novas ferramentas (modelação matemática e instrumentos socioeconómicos) de gestão do uso de pesticidas desenvolvidas para o projecto europeu PEGASE "Pesticides in European Groundwaters: detailed study of representative aquifers and simulation of possible evolution scenarios", cf. Secção 5.6], incluir as águas de superfície, fechando assim a componente hídrica da bacia, e integrar o estudo português num âmbito mais vasto de diversos estudos semelhantes a realizar nos diferentes países envolvidos.

O tópico "contribuir para a melhoria da eficiência na agricultura criando maior riqueza mas mantendo a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos" constitui uma das prioridades de actuação definidas na Acção de Coordenação Europa-Ásia ASEMWaterNet, do 6.º Programa-Quadro de Investigação, em curso no período 2005/09, com a participação de 32 parceiros de diversos países, cujo objectivo global é promover a cooperação científica e tecnológica entre a Europa e a Ásia na gestão de recursos hídricos (cf. [http://www.Inec.pt/organizacao/dha/nas/estudos\\_id/ asemwaternet](http://www.Inec.pt/organizacao/dha/nas/estudos_id/ asemwaternet)). No âmbito das diversas reuniões havidas, que contaram com a participação do LNEC enquanto parceiro desta Acção e líder de um dos grupos de trabalho, foi manifestado o interesse de colaboração nesta proposta.

Na medida em que esta proposta está actualmente a ser preparada com os parceiros adiante referidos, optou-se por apresentar na língua de trabalho o texto relativo aos objectivos, à metodologia e aos benefícios esperados.

### **10.4.2 Objectivos**

The project has two main objectives:

- ◆ Improve the scientific knowledge regarding the interrelation between the land use practices and the protection of soil and groundwater quality, towards a more sustainable agriculture.
- ◆ Contribute to support future decisions in terms of more adequate policies regarding rural land use planning (type of crops and associated fertilizers and treatment techniques), taking into consideration the protection of the environment based on vulnerability and risk concepts.

To attain the Project goals – *i.e.* to optimize rural land use in such a way that the water quality impositions downgradient can be satisfied – it is necessary to understand the existing pressures and their effects for the different characteristics of soil and water at a basin scale. Monitoring and modelling the overall process, for different cultures and soil types, will be carried out to assess present and future impacts. Based on those results, an optimization model approach will be carried out in order to propose a response, materialized in several optimized land use schemes for each study area.

The implementation of the scientific output of the project will be analysed by considering the actors that need to be involved, which will help analysing the social and economical dimension that eventual changes, *e.g.* in type of crops and practices, might have and the better way to act.

This project will give support for the implementation of decision-making strategies by regional institutions, such as the Regional Environmental Agency and Agriculture Ministry, responsible for regional and rural planning, taking into account aquifer vulnerability regarding the increasing use of nitrogen and other fertilizers, as well as pesticides, in irrigated areas.

This approach is supported by several European Directives: Water Framework Directive (2000/60/CE); Groundwater Directive (2006/118/CE); Nitrate Framework Directive (91/676/CE, vulnerable zones); Environmental Farming Proposals (91/2078/EEC); and Drinking Water Regulations (80/778/EEC).

### **10.4.3 Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver**

A metodologia que se propõe inclui o seguinte conjunto de actividades, estruturadas de acordo com o conceito DPSIR (cf. Secção 3.5):



1. Case-study areas definition and associated **drivers** coming from agriculture (**D**):
  - a. Selection of small watershed (basin) areas in different countries where agriculture is the main (or only) pollution driver.
  - b. Inventory of the historical and existing annual land use plan at the site and the expected/existing main agriculture drivers.
  - c. Analysis of previous studies in the area and inventory of existing infrastructures that can be used for further groundwater monitoring.
  - d. Delimitation of irrigation plots with different soil types.
  - e. Selection of (three) different crops to be studied (irrigation schemes, fertilizers, and treatment techniques associated).
  
2. Characterization of the **pressures** caused by different crops (**P**):
  - f. Field quantification of fertilizers (e.g. nitrogen, potassium, phosphates) and pesticides input needed for the main crops in the basin, considering their different irrigation schemes and treatment techniques.
  
3. Characterization of the **state** caused by different crops (**S**):
  - g. Installation of the monitoring devices for quantitative agro-meteorological data collection (rainfall, ET, etc.), or assessment of the possible use of existing facilities.
  - h. Installation of the monitoring and sampling devices for soil, vadose zone, groundwater and surface water (soil moisture, Teflon capsules in the vadose zone, piezometers for groundwater, flowrate devices for surface water).
  - i. Assessment of different land use effects in the migration of pollutants (nitrates, phosphates, and pesticides). This action will be carried out in (a) the field and in (b) laboratory soil-columns, for some of the cases.
  - j. The field monitoring of crop effects will be carried out for two soil types (A and B) in which three different types of crop. For both soil types, the effects of the migration of nitrates, chlorides, phosphorous and some pesticides, will be monitored and analysed in four media: soil (soil itself), vadose zone (Teflon capsules), groundwater (piezometers) and surface water (samplers).
  - k. The laboratory tracer tests, to be performed in soil-columns, will be used to reproduce some field experiments in the saturated zone and possibly also in the vadose zone. This work will have the cooperation of the master M4 (cf. Section 11.5).
  
4. Characterization of the **impact** caused by different crops (**I**):
  - l. Assessment of the groundwater recharge in the irrigated areas.
  - m. Assessment of groundwater vulnerability and risk to pollution.
  - n. Evaluation of different land use schemes in the concentration of pollutants (nitrates, phosphates, and some applied pesticides) in the soils, the vadose zone and the groundwater taking into account specific conditions of the study area.

- o. Modelling flow and transport for the different land use schemes by using deterministic models for nitrate and pesticides. Calibration of the field results. This work will have the cooperation of the PhD D3 (cf. Section 11.9).
  - p. Risk analysis for different land use schemes and their effects in the groundwater quality in the next decades. This work will have the cooperation of the PhD D1 (cf. Secção 11.7).
5. Evaluation of possible **responses** for a more sustainable land use (**R**):
- q. Development of decision models (objectives and constraints). This work will have the cooperation of the PhD4 (cf. Section 11.9). These models will include:
    - the cost and benefit functions,
    - the agriculture production function,
    - the constrain of good water quality status.
  - r. The information and results from the models used in the previous tasks will be incorporated in order to link the groundwater response to the agriculture practices regarding quantity and quality issues.
  - s. Assessment of the more suitable optimization methods to solve the decision models developed. The decision models previously built will be stochastic non-linear mixed integer models. These models will involve uncertainty, non-linear functions, numerical approximations of differential equations with partial derivatives and combinatorial decisions (yes or no decisions).
  - t. Resolution of the decision models through the use of the chosen methods. Some work calibration of the metaheuristics algorithms have to be accomplished and different robustness measures have to be evaluated.
  - u. Social dimension aspects will also be taken into account by considering the actors that need to be involved, and by the benefits/injury that eventual changes, *e.g.* in type of crops and practices, might have, as well as the better way to implement them.
  - v. Optimization of land cover in the studied areas and associated mitigation measures.

A tabela seguinte apresenta um cronograma do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	DPSIR	Designação da Tarefa	Ano 1				Ano 2				Ano 3			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	D	Case-study areas definition and associated drivers coming from agriculture	██████████											
2	P	Characterization of the pressures caused by different crops	██████████											
3	S	Characterization of the state caused by different crops					████████████████████							
4	I	Characterization of the impact caused by different crops					██████████████████████████████							
5	R	Evaluation of possible responses for a more sustainable land use									██████████████████			

#### **10.4.4 Planeamento dos meios humanos necessários**

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento do programa no LNEC são os seguintes:

- ◆ 9 meses de Investigador.
- ◆ 5 meses de Técnico Superior.
- ◆ 29 meses de Bolseiro de Doutoramento e 4 meses de Bolseiro de Mestrado (cf. Quadro 27) com formação académica de base nas áreas de geologia ou engenharia agrónómica ou agrícola, de ambiente, química, bioquímica. Os bolseiros, além de dominarem as matérias da sua formação de base, deverão possuir experiência na área das ciências agrárias, bioquímica, hidrologia e hidrogeologia que complementarão com os conhecimentos e a experiência que serão adquiridos pela participação nas actividades previstas para o programa.

Para o desenvolvimento deste programa conta-se com a participação de outras instituições nacionais, nomeadamente o Centro Operativo de Tecnologias de Regadio (COTR) e/ou o Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica Agrícola (IDRHa), para o desenvolvimento dos trabalhos de campo e articulação com os demais trabalhos em curso neste domínio. A Universidade de Coimbra (UC) também será chamada a colaborar nos modelos de optimização do uso e ocupação do solo agrícola.

Este programa contará com a colaboração de dois países europeus com interesse e experiência neste domínio [Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) de França e Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS) da Dinamarca] e com três parceiros asiáticos [ChangJiang Water Resources Commission (CWRC) da China, o Institute of Environmental Technology (IET) e o Institute of Mechanics, National Center for Science and Technology (IMECH), ambos do Vietnam].

#### **10.4.5 Benefícios esperados**

This project has a clear importance in what concerns the integrated watershed land use planning aiming a sustainable use of soil capable of protecting downgradient water resources.

The results expected with this project can be divided in two main aspects:

- ◆ Suggestions for better land use management: determination of more suitable land use crops and fertilizers application for a future better protection of the groundwater quality from diffuse pollution;
- ◆ Improvement of socio-economic conditions: application of an environmentally more sustainable agriculture, namely by contributing to avoid the declaration of other vulnerable zones (Directive n. 91/676/CE that poses several constrains to agriculture practices).

The scientific activity to be developed foresees a clear engagement with the authorities responsible for the land use in the case study area in order to connect the farmers, land use planners, landowners and the local authorities in the project purpose. Their advices and opinions will guide the scenarios to be investigated in order that in the end the results can be useful for their future decisions in terms of fertilizers applications and crop to be selected, aiming the awareness and protection of groundwater quality.

**Programa de Estudo 2 – AMBIGOLFE**  
**Domínio de aplicação: Portugal**  
**Tipo de Projecto: I&D nacional; FCT**

---

## **10.5 Sustentabilidade AMBIental do uso de águas residuais para rega de campos de GOLFE**

### **10.5.1 Enquadramento e justificação**

A gestão de campos de golfe baseada em boas práticas ambientais pode influenciar de forma positiva o ambiente. Conhecem-se diversos casos em que os campos de golfe estão associados a uma melhoria das condições dos habitats onde se inserem e a uma maior biodiversidade. No entanto, no âmbito da temática água e ambiente há dois aspectos que merecem atenção numa perspectiva protecção e de gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos das áreas de campos de golfe: a quantidade de água utilizada e a protecção da sua qualidade.

Relativamente à origem da água, vários tipos de proveniências, subterrâneas e superficiais, podem ser utilizadas. Diversos autores (cf. NJDEP) sugerem a seguinte lista de prioridades para a origem de água, por ordem de preferência: água de escorrência armazenada em bacias de retenção ou detenção no local; água residual tratada; água de abastecimento público; massas de água superficial existentes; e águas subterrâneas.

Marecos do Monte (1994) defende que as águas residuais adequadamente tratadas podem ser utilizadas como recurso hídrico, nomeadamente na rega, sendo esta medida geralmente competitiva do ponto de vista técnico-económico, além de ser ambientalmente recomendável.

A empresa Águas do Algarve, S.A. (AdA), entidade gestora dos Sistemas Multimunicipais de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais da Região do Algarve, efectuou um estudo para avaliação das potencialidades de reutilização de águas residuais na região (que tem cerca de metade dos campos de golfe do País), nomeadamente a nível da oferta de águas residuais, procura pelos campos de golfe e respectivo cruzamento de informação. Uma das principais conclusões do estudo refere que "a generalidade das ETAR seleccionadas neste estudo disponibilizam caudal suficiente para fazer face às necessidades de rega quer dos campos de golfe existentes (31 campos; 28,5 campos equivalentes de 18 buracos; 513 buracos; 8,7 hm<sup>3</sup>/ano) quer também dos previstos (mais 19 campos; aproximadamente 19

campos equivalentes; 341 buracos; 5,7 hm<sup>3</sup>/ano)" (Martins *et al.*, 2006).

Quanto à protecção da qualidade da água, as boas práticas recomendam a adopção de técnicas que evitem ou, pelo menos, minimizem, o uso de químicos, em especial de pesticidas, favorecendo uma boa gestão mecânica e cultural da relva que evite a poluição dos solos e das águas na sua envolvente.

A aplicação de químicos em campos de golfe é geralmente efectuada com fertilizantes inorgânicos e pesticidas, maioritariamente fungicidas e insecticidas, pelo que a análise da sua potencial evolução nos solos e nas águas é equivalente ao que foi apresentado para estes elementos para o caso da agricultura, cf. Capítulo 5. A sua utilização não é idêntica em todo o percurso de um campo de golfe. Geralmente as áreas onde a sua aplicação é mais incisiva são os *tees*, *greens* e a área envolvente dos *greens*. Também nos *fairway* são efectuadas algumas aplicações mas em cerca de 44% de toda a área não há qualquer aplicação de químicos ([https://www.bestcourseforgolf.org/content/environment/key\\_environment/use\\_of\\_chemical](https://www.bestcourseforgolf.org/content/environment/key_environment/use_of_chemical)).

Os campos de golfe apenas utilizam uma pequena fracção do conjunto de químicos que é utilizado para a agricultura e sectores afins. Não são uma ameaça de poluição tão difusa como a agricultura, representando sim uma fonte pontual de poluição.

Diversos estudos foram realizados no sentido de analisar a poluição em campos de golfe. Os resultados obtidos mostram que a própria relva é um filtrante e absorvente natural de poluentes e que o elevado número de microrganismos e de bactérias presentes, na relva e no solo, também ajudam à retenção e/ou eliminação de poluentes, evitando a sua lixiviação para horizontes mais profundos. Não obstante, o frequente uso excessivo de fertilizantes e de pesticidas, e também de água em excesso, são condições que aumentam o risco de contaminação.

O conhecimento da situação real em Portugal em relação à qualidade dos solos e das águas subterrâneas nas áreas dos campos de golfe, em especial em áreas regadas com águas residuais tratadas, é um domínio por investigar sendo de grande importância o estudo do destino dos fertilizantes e dos pesticidas aplicados. Quelhas dos Santos (2000) apresenta uma análise sobre os campos de golfe, sua fertilização e qualidade do ambiente, onde sintetiza os principais fenómenos associados à degradação da qualidade do ambiente e refere os processos que se afiguram susceptíveis de ser usados para a evitar.

### **10.5.2 Objectivos**

O objectivo principal deste programa é avaliar se o uso de águas residuais para rega de campos de golfe pode ser compatível com os aspectos de sustentabilidade ambiental dos recursos hídricos, exigidos na Directiva-Quadro da água, permitindo evitar a deterioração do estado de todas as massas de água, com o objectivo de alcançar um Bom estado das águas

subterrâneas (químico e quantitativo) em 2015.

Para o efeito será analisado o estado de qualidade dos solos e das águas em campos de golfe irrigados com águas residuais tratadas, por comparação com outros tipos de irrigação, e será avaliada a sua sustentabilidade a longo prazo do ponto de vista da protecção da qualidade dos recursos hídricos de jusante.

### 10.5.3 Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver

A metodologia que se propõe inclui o seguinte conjunto de actividades, estruturadas de acordo com o conceito DPSIR (cf. Secção 3.5):

1. Identificação da **força motriz (D)**:
  - a. Identificação dos campos de golfe em Portugal onde há utilização de águas residuais para rega e perspectivas de evolução neste sector dentro dos actuais 69 campos existentes e dos novos campos perspectivados.
  - b. Recolha e análise da informação existente sobre a problemática da utilização de águas não convencionais (de menor qualidade) para rega de campos de golfe, designadamente de águas residuais tratada.
2. Selecção de casos de estudo e caracterização das **pressões** associadas (**P**):
  - c. Selecção de locais de estudo, em consonância com os actores locais, onde sejam utilizadas águas residuais para rega, incluindo possivelmente 3 a 4 campos de golfe na região do Algarve, 2 dos quais irrigados com águas residuais.
  - d. Análise de estudos anteriores efectuados sobre a área seleccionada. Estudos sobre solos, geologia, hidrogeologia, oferta de águas residuais, disponibilidades hídricas.
  - e. Caracterização dos consumos/necessidades médios de água do campo de golfe ao longo do ano hidrológico.
  - f. Caracterização físico-química da água de rega após todas as fases de tratamento da E.T.A.R. até aos aspersores e suas potenciais variações ao longo do ano.
  - g. Delimitação de parcelas experimentais nos vários locais de estudo que apresentam características semelhantes do ponto de vista de solos e características topográficas, com aplicação de águas residuais tratadas e com água limpa.
  - h. Inventariação do volume de água aplicada e suas características físicas, químicas e biológicas, para as duas situações: utilização de águas residuais e de águas tratadas. Determinação da carga poluente associada à rega por área.
  - i. Identificação dos locais de irrigação com maior interesse de análise face aos processos de rega (locais com maior aplicação de água, fertilizantes e

pesticidas).

3. Caracterização do **estado (S)**:

- j. Caracterização global das áreas quanto ao clima, tipo de solos, geologia e hidrogeologia, qualidade e quantidade das águas subterrâneas, identificação de infra-estruturas de águas subterrâneas que possam vir a servir para a monitorização.
- k. Definição de um plano de monitorização que inclua todos os meios de interesse (solos, zona vadosa, zona saturada, águas superficiais) e que contemple a definição dos locais de amostragem (também em profundidade), dos parâmetros a monitorizar, das técnicas e métodos de recolha, da periodicidade de amostragem e dos relatórios de monitorização a preparar, entre outros aspectos.
- l. Realização do plano proposto nas 3 a 4 parcelas experimentais definidas para o projecto, em consonância com os gestores dos golfes.
- m. Caracterização do balanço hídrico, *i.e.* recarga/extracções e a avaliação da variação dos níveis piezométricos.
- n. Caracterização da qualidade através da selecção dos parâmetros e das respectivas concentrações indicadoras de contaminação nos vários níveis de análise: água residual tratada, relva, solos, água na zona vadosa e águas subterrâneas.

4. Avaliação do **impacte (I)**:

- o. Análise e interpretação dos resultados obtidos nas parcelas experimentais ao longo do tempo e nos vários meios monitorizados.
- p. Estudo da migração de águas residuais através dos solos recolhidos em determinadas áreas dos campos de golfe analisados. Análise da facilidade de lixiviação para horizontes mais profundos e análise da capacidade de retenção da poluição pelos solos envolventes. Modelação numérica dos ensaios realizados. Esta tarefa terá a colaboração do mestrando a trabalhar no mestrado M4 (cf. Secção 11.4).
- q. Modelação matemática do escoamento e transporte de massa quer na zona vadosa quer na zona saturada. A modelação da zona saturada tem por objectivo a projecção de cenários da evolução da qualidade da água para as décadas seguintes, partindo do pressuposto que a qualidade da água de rega se mantenha. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D3 (cf. Secção 11.9).
- r. Identificação dos riscos associados à utilização de águas residuais para rega de campos de golfe na qualidade das águas de jusante, *i.e.* contaminação de águas subterrâneas e de solos. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D1 (cf. Secção 11.6).



## 5. Análise de possíveis **respostas (R)**:

- s. Análise da viabilidade ambiental da utilização de águas residuais para rega de campos de golfe.
- t. Identificação de medidas complementares de gestão do uso da água e optimização dos procedimentos de rega, visando para atingir melhor qualidade dos solos e das águas a jusante.
- u. Aplicação de DSS para análise das melhores alternativas de irrigação de campos de golfe (água de escorrência armazenada em bacias de retenção ou detenção no local; água residual tratada; água de abastecimento público; massas de água superficial existentes; e águas subterrâneas) atendendo às características intrínsecas dos locais, disponibilidade dos vários tipos de água e às restrições legais em termos de qualidade da água de jusante. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D4 (cf. Secção 11.9).
- v. Identificação de potenciais medidas alternativas de mitigação e de adaptação, contemplando cenários com diferentes origens de água ou onde a aplicação de águas residuais seja alternada com águas de melhor qualidade. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D2 (cf. Secção 11.7).

A tabela seguinte apresenta um cronograma do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	DPSIR	Designação da tarefa	Ano 1				Ano 2				Ano 3			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	D	Identificação da problemática da utilização de águas não convencionais para rega de campos de golfe	██████████											
2	P	Seleção de casos de estudo, sua caracterização e análise das pressões associadas, e.g. carga poluente associada à rega	██████████											
3	S	Caracterização do estado, e.g. relva, solos, água na zona vadosa e águas subterrâneas					██████████							
4	I	Avaliação do impacte, i.e. análise dos resultados obtidos ao longo do tempo e nos vários meios monitorizados. Modelação matemática do escoamento e transporte de massa.					██████████							
5	R	Análise da resposta: viabilidade das medidas actuais; identificação de medidas complementares e alternativas									██████████			

### 10.5.4 Planeamento dos meios humanos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento do programa no LNEC são os seguintes:

- ◆ 9 meses de Investigador.
- ◆ 5 meses de Técnico Superior.
- ◆ 24 meses de Bolseiro de Doutoramento e 16 meses de Bolseiro de Mestrado (cf. Quadro 27) com formação académica de base nas áreas de geologia ou engenharia agrónómica ou agrícola, de ambiente, química, ou bioquímica. Os bolseiros, além de dominarem as matérias da sua formação de base, deverão possuir experiência na área das ciências agrárias, bioquímica, hidrologia e hidrogeologia que complementarão com os

conhecimentos e a experiência que serão adquiridos pela participação nas actividades previstas para o programa.

Um projecto esta natureza só fará sentido em estreita articulação com a Federação Portuguesa de Golfe (FPG), na medida em que uma das suas missões na área do ambiente é justamente "contribuir para o incremento da investigação científica nas áreas de interesse para a modalidade, efectuando protocolos de colaboração com as universidades e com os centros de investigação, nomeadamente para desenvolvimento de novos tipos de relvas adequadas ao clima português, técnicas de irrigação mais eficientes, controlo integrado de pestes, entre outros" (<http://www.fpg.pt/>).

O programa deverá ainda contar com colaboração das entidades que gerem os campos de golfe a seleccionar, bem como com a entidade gestora responsável pela recolha e tratamento de águas residuais na área de estudo e, ainda, com a ARH do Algarve (ARHAlg), região onde se pretende aplicar o programa.

Para o desenvolvimento deste programa conta-se com a participação de outros sectores do LNEC no domínio da engenharia sanitária, nomeadamente o Núcleo de Engenharia Sanitária do Departamento de Hidráulica e Ambiente (NES/LNEC), com a Estação Agronómica Nacional (EAN), com a Universidade do Minho (UM) e com a Universidade do Algarve (UAlg), para a caracterização das águas residuais tratadas e suas potenciais variações ao longo do ano, para o estudo dos solos ao longo do período de análise e para a análise do balanço necessidades e disponibilidades de água.

### **10.5.5 Benefícios esperados**

Com este programa pretende-se contribuir para melhorar a sustentabilidade da utilização dos recursos hídricos, através da utilização de recursos não convencionais para a irrigação de campos de golfe, desde que a oferta de águas residuais sirva a procura pelos campos de golfe e desde que sejam respeitados os requisitos de protecção reflectidos no princípio da precaução.

O benefício esperado com este programa é permitir analisar a sustentabilidade ambiental da utilização de águas residuais para a rega de campos de golfe, *i.e.* sem que tal constitua um perigo para a qualidade dos solos e das águas subterrâneas da área. Pretende-se, assim, criar algum do conhecimento necessário para decidir o alargamento deste procedimento a outros campos de golfe ou, pelo contrário, alertar para eventuais problemas de contaminação que possam surgir a médio ou a longo prazo, sugerindo-se alternativas de sistemas de rega.

**Programa de Estudo 3 – AVAL AERO**  
**Domínio de aplicação: Portugal, Europa**  
**Tipo de Projecto: Investigação nacional; FCT**

---

## **10.6 AVALiação da contaminação de águas subterrâneas e de solos em áreas envolventes de AEROportos**

### **10.6.1 Enquadramento e justificação**

A construção e o funcionamento de infra-estruturas rodoviárias e aeroportuárias são actividades que exercem pressões no meio ambiente e que podem estar na origem de processos de contaminação. Nesse contexto torna-se fundamental analisar a forma como se pode processar a dispersão de contaminantes no ambiente hídrico envolvente e os possíveis processos para minimizar essa contaminação, atendendo a locais mais sensíveis, visando que essas actividades assegurem a protecção do ambiente de forma sustentável.

O Capítulo 6 deste programa dedica-se à apresentação desta temática. Refere-se que as interações entre uma infra-estrutura aeroportuária e a água são múltiplas e complexas. Os seus efeitos fazem-se sentir tanto na fase de construção como na de exploração da infra-estrutura. Na fase de construção, são os trabalhos de escavação os que geralmente induzem as maiores alterações em termos de produção de contaminantes, na medida em que podem aumentar a erosão do solo e, assim, transportar matéria em suspensão para os cursos de água mais próximos, além de poder facilitar a entrada de contaminantes para o subsolo e para as águas subterrâneas.

Na fase de exploração, estudos conduzidos por Le Dean *et al.* (1995) sobre as águas de escorrência geradas numa plataforma aeroportuária põem em evidência que a origem deste tipo de contaminação se deve a: (1) contaminação atmosférica que é responsável por cerca de 15 a 25% dos contaminantes encontrados nas águas de escorrência e (2) acção da precipitação e lavagem das superfícies pavimentadas que passa, primeiro, por uma fase de dissolução dos elementos solúveis depositados à superfície após episódios de precipitação e, depois, pelo arraste e transporte dessas partículas quando o volume de água é suficiente para causar escoamento. Num contexto actual a maioria das águas de escorrência são devidamente colectadas e tratadas mas nos aeroportos mais antigos nem sempre estes procedimentos foram tomados e ocorrem várias situações onde há fissuras no pavimento que conduzem à migração de poluentes gerados pelas águas de escorrência (aspecto analisado na Acção

COST 351, cf. Secção 6.5).

A contaminação originada pelas águas de escorrência pode ser distinguida consoante a sua origem e duração como (Gardim, 1998 e Legret *et al.*, 1999): (1) crónica, resultante do normal funcionamento da infra-estrutura; (2) sazonal, associada ao período de Inverno em que são aplicados produtos de degelo e (3) acidental, resultante de um incidente.

Além da origem de contaminação de solos e de águas subterrâneas acima referida, a própria deposição seca difusa de gases, bem como a eventual existência de fissuras em pavimentos julgados impermeáveis pode estar na origem de processos de contaminação.

As questões relacionadas com a contaminação dos solos e das águas das áreas envolventes a aeroportos é uma matéria apenas recentemente estudada, pelo que a informação existente é ainda escassa e reporta-se essencialmente às duas últimas décadas. Em Portugal, à data, desconhece-se qualquer estudo no domínio da monitorização de águas e de solos nas áreas envolventes a aeroportos pelo que esta área foi identificada, na Secção 6.6, como prioritária em termos da criação de uma metodologia de análise desta problemática que possa vir a ser aplicada em alguns aeroportos do País.

O Núcleo de Águas Subterrâneas encontra-se presentemente a trabalhar neste domínio através de dois projectos recentemente iniciados para o Governo Regional dos Açores (através da Câmara Municipal de Praia da Vitória, CMPV) e para o Novo Aeroporto (NAER, S.A.). Serão aproveitadas as sinergias decorrentes da elaboração destes dois estudos para a realização do programa que agora se propõe.

### **10.6.2 Objectivos**

Os objectivos deste programa são analisar a relevância da contaminação aeroportuária (comparativamente a outros tipos de poluição), analisar os mecanismos de dispersão de poluentes, nomeadamente os processos de migração no solo e nas águas subterrâneas das áreas envolventes, avaliar o impacte físico e químico dos contaminantes e propor medidas apropriadas para assegurar a redução gradual da contaminação hídrica em áreas envolventes a aeroportos.

Esta é uma temática que ainda não foi abordada em Portugal e, mesmo a nível internacional, os estudos neste domínio são muito escassos, incidindo a esmagadora maioria dos estudos na qualidade do ar e não na qualidade dos solos e/ou das águas.

### 10.6.3 Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver

A metodologia que se propõe inclui o seguinte conjunto de actividades, estruturadas de acordo com o conceito DPSIR (cf. Secção 3.5):

1. Identificação da **força motriz (D)**:
  - a. Localização dos principais aeroportos em Portugal com interesse para análise de eventuais processos de contaminação.
  - b. Recolha e análise de informação global sobre a potencial contaminação hídrica causada por aeroportos, em complemento ao já efectuado na Secção 6.3.2.
  
2. Selecção de casos de estudo e caracterização das **pressões** associadas (**P**):
  - c. Análise de estudos que possam ter sido efectuados no domínio da contaminação de solos e de águas em áreas envolventes a aeroportos e identificação das principais pressões aí consideradas.
  - d. Identificação e selecção de aeroportos em Portugal para casos de estudo.
  - e. Análise de estudos anteriores efectuados sobre as áreas seleccionadas.
  - f. Caracterização global das áreas quanto ao clima, tipo de solos, geologia e hidrogeologia, qualidade e quantidade das águas subterrâneas, identificação de infra-estruturas de águas subterrâneas que possam vir a servir para a monitorização.
  - g. Caracterização do sistema de drenagem de águas da plataforma, dos locais de armazenamento de águas (também tratadas) e de resíduos e de locais onde possa haver rejeição de contaminantes ou manuseamento de substâncias potencialmente contaminantes.
  - h. Identificação das áreas envolventes com maior interesse de estudo no que respeita a contaminação de solos e de águas subterrâneas, em função das áreas definidas em g.
  
3. Caracterização do **estado (S)**:
  - i. Determinação de locais para realização (não destrutiva) de perfis de resistividade e para levantamento electromagnético de forma a detectar eventuais focos de contaminação na região e a aumentar o conhecimento da estrutura geológica e tectónica. Este tipo de levantamento deverá permitir guiar a monitorização da qualidade de solos e de águas no local.
  - j. Esquematização de um plano de monitorização de solos e de águas subterrâneas em função dos resultados obtidos nos perfis de resistividade e do modelo conceptual de escoamento na região (equacionado com base na informação pré-existente ou recolhida em infra-estruturas existentes no local).
  - k. Definição do plano, que poderá contemplar a execução de novas infra-estruturas, através da definição dos locais de medição do nível piezométrico e

de amostragem, dos parâmetros a monitorizar, das técnicas e métodos de recolha, da periodicidade de amostragem e dos relatórios de monitorização a preparar, entre outros aspectos.

- l. Execução do plano de monitorização.
  - m. Caracterização da quantidade através da caracterização da precipitação e da determinação da recarga/extracções e da monitorização da variação dos níveis piezométricos.
  - n. Caracterização da qualidade através da análise dos parâmetros seleccionados e das respectivas concentrações indiciadoras de contaminação nos vários níveis de análise: efluentes, água de escorrência, solos, água na zona vadosa e águas subterrâneas.
4. Avaliação do **impacte (I)**:
- o. Análise e interpretação dos resultados obtidos. Caracterização do tipo e intensidade de eventuais contaminações e sua localização espacial e variações sazonais.
  - p. Modelação numérica das águas subterrâneas do local tendo em vista caracterizar o escoamento subterrâneo e a qualidade das águas subterrâneas.
  - q. Previsão de cenários de evolução da qualidade das águas subterrâneas em função dos dados de rejeição de efluentes em termos de localização, de datas, de cargas contaminantes, etc.
  - r. Análise do risco de contaminação das águas subterrâneas em áreas envolventes a aeroportos e análise da sua extensão Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D1 (cf. Secção 11.7).
5. Identificação de possíveis **respostas (R)**:
- s. Identificação de medidas destinadas a proteger os solos e as águas subterrâneas nas áreas envolventes a aeroportos, em função do tipo de poluentes presentes, das concentrações encontradas e da sua dispersão.
  - t. Identificação de eventuais medidas de mitigação e de reabilitação de solos e de águas subterrâneas na área envolvente do aeroporto. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D2 (cf. Secção 11.7).
  - u. Estudo de possíveis medidas a implementar nos aeroportos analisados, tendo em vista assegurar a redução gradual da contaminação hídrica nas áreas envolventes.

A tabela seguinte apresenta um cronograma do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	DPS/IR	Designação da Tarefa	Ano 1				Ano 2				Ano 3			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	D	Identificação da força motriz	██████████											
2	P	Seleção de casos de estudo e caracterização das pressões associadas	██████████											
3	S	Caracterização do estado					██████████							
4	I	Avaliação do impacte					██████████							
5	R	Identificação de possíveis respostas									██████████			

#### 10.6.4 Planeamento dos meios humanos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento do programa no LNEC são os seguintes:

- ◆ 9 meses de Investigador.
- ◆ 6 meses de Técnico Superior.
- ◆ 11 meses de Bolseiro de Doutoramento (cf. Quadro 27) com formação académica de base nas áreas de geologia ou geofísica, engenharia civil, de ambiente, química. Os bolseiros, além de dominarem as matérias da sua formação de base, deverão possuir formação na área de hidroquímica e de bioquímica que complementarão com os conhecimentos e a experiência que serão adquiridos pela participação nas actividades previstas para o programa nomeadamente na componente de geofísica.

Para o desenvolvimento deste programa conta-se com a participação de outros sectores do LNEC no domínio da prospecção electromagnética, designadamente do Núcleo de Geologia de Engenharia e Geotecnia Ambiental (NGEA) do DG e do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE) do DHA na componente relativa ao estudo das águas de escorrência. Contar-se-á igualmente com a assessoria do Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) que tem desenvolvido diversos trabalhos nesta temática.

#### 10.6.5 Benefícios esperados

Os benefícios esperados com este programa relacionam-se com o incremento dos conhecimentos no domínio da contaminação em zonas aeroportuárias, ao nível do tipo de contaminantes encontrados, suas principais formas de dispersão no meio ambiente envolvente (solos e águas), limites das áreas envolventes atingidas, de forma a permitir definir o tipo de infra-estruturas e meios mais adequados à minimização deste tipo de contaminação e à reabilitação de áreas já contaminadas.

## **Programa de Estudo 4 – ID ROADS**

**Domínio de aplicação: Europa**

**Tipo de Projecto: *Coordination action* (COST) do 7.º PQ da UE**

---

### **10.7 Identification and protection of water bodies sensitive to pollution from ROADS**

#### **10.7.1 Enquadramento e justificação**

A temática da contaminação proveniente de estradas é analisada e sistematizada no Capítulo 6. O NAS tem vindo a debruçar-se sobre este assunto desde 1997, como resultado da sua participação no projecto POLMIT "Pollution of Groundwater and Soil by Road and Traffic Sources: Dispersal Mechanisms, Pathways and Mitigation Measures", do 4.º Programa-Quadro da UE. Este projecto, que decorreu entre 1997 e 2000, contou com a colaboração de sete laboratórios de investigação e visou melhorar o conhecimento científico (experimental) relacionado sobre a poluição causada por estradas a nível europeu.

Na sequência dos resultados e da experiência alcançada através do programa referido, o INAG assinou com o LNEC um protocolo de cooperação para a elaboração do Estudo "Avaliação e Gestão Ambiental das Águas de Escorrência de Estradas", que decorreu entre 2001 e 2004, e que contou também com o apoio e a experiência do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do DHA na componente relativa ao estudo e à gestão das águas de escorrência de estradas. Esta colaboração dos dois núcleos manteve-se num outro programa elaborado para a Estradas de Portugal, S.A. intitulado "Avaliação da Eficácia das Medidas de Minimização de Impactes Ambientais Implementadas em Portugal". O Estudo teve como objectivo dar um forte contributo para a avaliação da eficácia das medidas de minimização de impactes ambientais implementadas em Portugal, nomeadamente no que respeita aos sistemas de tratamento de águas de escorrência e à protecção do ambiente envolvente (água e solos), incluindo ainda as componentes do ruído e da fauna.

O trabalho desenvolvido neste domínio estendeu-se à colaboração do NAS numa acção COST 351, intitulada *WATMOVE Water Movements in Road Pavements and Embankments*, no âmbito da qual foi editado um livro (cf. Dawson *et al.*, 2008) no qual o LNEC é responsável por um capítulo e colaborou na elaboração de mais outros dois capítulos.



O resultado do trabalho realizado neste domínio na última década evidencia que as diferentes abordagens e práticas utilizadas para proteger as massas de água dos poluentes originados nas estradas carecem, quer a nível nacional quer a nível internacional, de procedimentos transparentes para definir e para proteger áreas mais sensíveis à poluição rodoviária (cf. Secção 6.6). Esta conduta conduz muitas vezes à realização de infra-estruturas desadequadas e sobredimensionadas, com elevados custos associados e que exigem procedimentos de manutenção pouco claros e demasiado dispendiosos.

Na sequência do exposto e dos trabalhos que vêm sendo desenvolvidos, está em curso uma colaboração bilateral entre Portugal (NAS e NRE) e a Eslovénia cujo um dos objectivos é elaborar uma proposta neste domínio a ser apresentada ao 7.º Programa-Quadro. Nas secções seguintes apresentam-se as linhas gerais para a proposta. O trabalho realizado em 2004 para o INAG (cf. Leitão *et al.*, 2005a e b [http://www.inag.pt/inag2004/port/a\\_intervencao/d\\_hidrico/pdf/estudos\\_amb/7-SILUSBA\\_ZonasSensiveisTL-AEB-AT.pdf](http://www.inag.pt/inag2004/port/a_intervencao/d_hidrico/pdf/estudos_amb/7-SILUSBA_ZonasSensiveisTL-AEB-AT.pdf)) no sentido de se definir uma metodologia para a identificação de zonas hídricas sensíveis aos poluentes rodoviários servirá de uma metodologia de base a ser analisada sob uma perspectiva mais abrangente de condições ambientais e legislativas que enquadre as exigências legais europeias e dos restantes países envolvidos.

Na medida em que esta proposta está actualmente a ser preparada com os parceiros adiante referidos, optou-se por apresentar na língua de trabalho o texto relativo aos objectivos, à metodologia e aos benefícios esperados.

### **10.7.2 Objectivos**

The main objective of this coordination action (CSA) is to propose a common European methodology for the identification and classification of water bodies sensitive to pollution from road infrastructures, aiming to promote environmentally more sustainable roads, considering the water resources protection, as required by the Water Framework Directive.

The purpose of this project is therefore to select and develop more sound procedures that help to define and protect the most sensitive water resources from road and traffic pollutants.

### **10.7.3 Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver**

The large amount of roads being constructed or in exploitation have specific impacts in the environment that depend on their pollution emissions – which depend on the traffic and cargo characteristics, the pavement, the road equipment and the maintenance – and on the characteristics of the receiving media (soil and water bodies) to retain or minimize that pollution (cf. Secção 6.3.1).

In view of that, it is neither possible nor desirable, economically and technically, to treat all runoff water coming from roads. Hence, there is a need for methodologies that can define the areas (soil and water bodies) that, by their intrinsic properties, show to be more sensitivity to road pollution, as well as impositions settled by law as special protection areas.

Several constraints can be recognized presently in the existing approaches to protect the environment from road runoff: solutions that depend only on technical considerations; measures that very much depend on subjective decisions during planning and designing; project quality control that it is not a well developed practice; requirements of EU legislation concerning good water status water protection are difficult to fulfil; wrong solutions and, therefore, excessive costs (short and long term) can easily occur; and, finally, sustainability and precaution, both in an environmental and economic perspective, are difficult to guarantee.

The main scientific interest of the project is to contribute to overcome the constraints identified by establishing a set of pollution control methodologies and minimization procedures that are useful for EU countries.

The methodology proposed includes the following activities:

1. Evaluation of existing procedures in participant countries (including legislation):
  - c. A first step will be the revision of existing literature concerning the definition of areas sensitive to road pollution (including handbooks and guidelines issued by road authorities in European countries and elsewhere).
  - d. This review will be performed in the basis of the reality (conceptual model) of each participating country, which altogether represent a wide range of situations, therefore allowing the extrapolation of the results of the project not only to Europe but also elsewhere.
2. Identification of sensitivity factors:
  - e. The identification of criteria for the inclusion of factors to be treated will be firstly analysed based on each participant country experience.
  - f. Intrinsic water bodies properties (physical and chemical) will be identified in function of their importance to the road pollution sensitivity (e.g. volume of receiving water bodies, flowrate, aquifer material permeability, soil properties, pollution degradation capacity, etc.), chemical and ecological characteristics.
  - g. The environmental setting of the water bodies such as topography, climatic conditions (precipitation regime, intensity and seasonal characteristics), geology, soil properties, vegetation, soil cover and land use.
  - h. The present and planned water uses will be taken into consideration when defining sensitive zones, as well as the sensibility of associated ecosystems, namely those already identified in other legislations (e.g. Natura 2000) by their

- natural value as a resource and associated ecosystems.
- i. Existing legal restrictions of each country will be considered for that country and analysed in terms of possible issue of importance for other countries.
3. Analysis of protection and mitigation measures to sensitive classes and definition of a cost-benefit methodology:
    - j. Comparison of approaches and procedures identified in the literature and current practices.
    - k. Definition of a methodology for the classification of the main factors to be considered in a cost-benefit analysis, using a DSS support. This work will have the cooperation of the PhD D4 (cf. Section 11.9).
  4. Architecture of the decision processes into a flow chart
    - l. The methodology will be based on a flowchart decision tree that leads to the definition of sensitive areas. These are areas where pollution mitigation measures are needed in order to accept a road.
    - m. Established decision tree can help in the transparent, complete, consistent and efficient revision of the design procedures.
    - n. The methodology will be applied to several case-studies to be chosen among the partners (using geographic information systems that allow analysing several layers of information that are interdependent):
      - i. establish the need for water resources protection within the existing infrastructures, and
      - ii. define the water bodies sensitiveness to road pollution.
  5. Meetings, dissemination, and book edition
    - o. A first meeting with the planners and road designers will be carried out in the first stage of the project. It will aim to fully understand their main concerns about environment protection and the socio-economic implications, as well as to analyse typical solutions and their implications.
    - p. A consistent definition of sensitive areas and their protection measures, which is independent of boundaries or people subjective decisions, will be proposed.
    - q. A final meeting with the road planners and designers will be carried out in order to transmit the project results.
    - r. The dissemination of the knowledge gathered, including the outcomes of the meetings with road planners and designers, will be congregated in a book and several national and international seminars where its content and main procedures are circulated.

A tabela seguinte apresenta um cronograma do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	Designação da Tarefa	Ano 1				Ano 2			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Evaluation of existing procedures in participant countries (including legislation)	██████████							
2	Identification of sensitivity factors		████████████████████						
3	Analysis of protection and mitigation measures to sensitive classes and definition of a cost-benefit methodology				████████████				
4	Architecture of the decision processes into a flow chart					████████████████████			
5	Meetings, dissemination, and book edition	██							

### 10.7.4 Planeamento dos meios humanos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento do programa no LNEC são os seguintes:

- ◆ 7 meses de Investigador.
- ◆ 1 mês de Técnico Superior.
- ◆ 12 meses de Bolseiro de Doutoramento e 12 meses de Bolseiro de Mestrado (cf. Quadro 27) com formação académica de base nas áreas de engenharia do ambiente ou civil, ou de geologia. Os bolseiros, além de dominarem as matérias da sua formação de base, deverão possuir experiência na área de sistemas de informação geográfica que possa vir a ser complementada com os conhecimentos e a experiência que serão adquiridos pela participação nas actividades previstas para o programa.

É natural contar com a participação de outros sectores do LNEC no desenvolvimento deste programa, cujo domínio se vem desenvolvendo desde 1997 no NAS, nomeadamente o NRE e o DT, este último para a análise de uma metodologia de análise custo-benefício.

Prevê-se que este programa seja concebido e lançado em diversas reuniões previstas no âmbito do protocolo bilateral em curso, entre Portugal e a Eslovénia, nos anos 2008 e 2009, intitulado "Identificação e Protecção de Massas de Água Sensíveis à Contaminação Rodoviária". Nestas reuniões prevê-se poder juntar alguns técnicos europeus com vasta experiência nestes domínios que fizeram parte da Acção COST 351 *Water movement in pavement and embankment*.

### 10.7.5 Benefícios esperados

Transport infrastructures cross many different natural environments (e.g. geology, different climatic conditions, etc.) and connect many urban centres with different historical development and planning practices. During last years EU countries have constructed large transport infrastructures and a lot of effort was placed in proper environmental protection measures and procedures. However, still many relevant questions remain. For example, during the cooperation in the project COST 351 "Water movement in pavement and embankment" it was realised that existing procedures for defining sensitive water bodies are deficient and imprecise.

Results of this project will facilitate the fulfilment of the demands of the Water Framework Directive in connection with the planning, design, construction, maintenance and operation of roads. The methodology will allow defining sensitive water bodies to road pollution, as well as protection measures to avoid water quality degradation, and therefore will contribute to consistent procedures that will have clear positive impact in sustaining water bodies quality. Results of work will target environmental scientist, planners, designers, engineers responsible for infrastructure maintenance and operation, environmental and infrastructure authorities, people responsible for monitoring, decision makers and infrastructure regulators.

**Programa de Estudo 5 – MILQAS**  
**Domínio de aplicação: Portugal**  
**Tipo de Projecto: Investigação nacional; FCT**

---

## **10.8 Minimização do Impacte de Lixeiras na Qualidade das Águas Subterrâneas**

### **10.8.1 Enquadramento e justificação**

As antigas lixeiras, inventariadas em 1998 para Portugal Continental como sendo 341 (MA, 1998), foram o destino final não apenas de resíduos sólidos urbanos (RSU) mas também, em diversos casos, o destino de muitos dos resíduos industriais perigosos e não perigosos produzidos. Estes depósitos foram encerrados no final dos anos 90 e substituídos por infra-estruturas de tratamento e de confinamento de RSU, cujo acompanhamento visando a protecção as águas subterrâneas contou com a assessoria do Núcleo de Águas Subterrâneas (NAS). Não obstante o importante passo dado no sentido de encerrar as lixeiras, o facto é que este se limitou a isolar a superfície dos referidos depósitos, pelo que a produção do lixiviado, embora muito mais reduzida, continua a existir neste sistemas como resultado dos processos de decomposição dos resíduos aí presentes.

A existência de diversas lixeiras no nosso País onde são diariamente produzidos lixiviados, cuja migração para horizontes mais profundos no solo se desconhece ao certo, necessita que se faça um investimento a nível nacional para a caracterização desta situação. A presença deste tipo de infra-estruturas constitui, por si só, um factor de risco grave de contaminação para os solos e para as águas subterrâneas das zonas envolventes, em especial quando estas se localizam em zonas com elevada vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação e põem em causa a protecção dos recursos hídricos. O Capítulo 7 apresenta uma súmula do estado da arte neste domínio, com uma análise dos potenciais problemas associados à poluição de lixeiras e uma descrição da actual situação em Portugal.

A importância deste tema e a necessidade de se investigar este domínio havia já sido levantada no NAS, designadamente no Programa de Habilitação de Lobo Ferreira (2000), com o título P4 - Monitorização de águas subterrâneas em antigas lixeiras e em novos aterros sanitários. Esta temática é aqui retomada na medida em que não teve seguimento à época, revelando-se agora uma necessidade incontornável no sentido de vir a cumprir os objectivos e metas impostos pela DQA. O programa então proposto foi reformulado à luz dos actuais

conhecimentos e atendendo as exigências de importantes novos instrumentos legais entretanto publicados.

A informação existente no País é muito limitada e encontra-se dispersa por trabalhos realizados de uma forma não coordenada. Nesse contexto foi identificada na Secção 7.5 como uma área de investigação necessária, efectuar um ponto de situação do actual estado de contaminação dos solos e das águas subterrâneas das áreas envolventes a lixeiras, alguns anos após o seu encerramento, através de um conjunto de situações representativas das condições geológicas, hidrogeológicas, topográficas e climáticas onde seja caracterizada a efectiva dimensão das plumas de contaminação e caracterizada a capacidade natural de atenuação dos contaminantes que é proporcionada por cada meio hidrogeológico, face às restantes condições existentes.

### 10.8.2 Objectivos

Os objectivos deste programa centram-se na caracterização ambiental, em termos de solos e de águas subterrâneas, das áreas de antigas lixeiras de RSU no nosso País, para diferentes situações geológicas, topográficas, climáticas e para diferentes estádios de evolução (anos de funcionamento). Pretende-se avaliar o risco deste tipo de infra-estruturas para o ambiente, o tipo de contaminantes a elas associado, a extensão da contaminação e os principais processos de contenção/reabilitação a considerar.

### 10.8.3 Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver

A metodologia que se propõe inclui o seguinte conjunto de actividades, estruturadas de acordo com o conceito DPSIR (cf. Secção 3.5):

1. Identificação da **força motriz (D)**:
  - a. Recolha e análise da informação existente sobre a problemática da contaminação em lixeiras e aterros de resíduos sólidos urbanos.
  - b. Análise de situações equivalentes de encerramento de lixeiras noutros países.
  - c. Classificação da informação existente sobre lixeiras no País e sua inclusão numa base de dados em SIG, nomeadamente com dados sobre o tipo de resíduos rejeitado, datas de deposição, volumes associados e composição, processos de deposição, datas de início de funcionamento e de encerramento.
  - d. Identificação de um conjunto de lixeiras que representem diferentes condições existentes no País permitindo ser representativas de uma percentagem importante de situações.
  
2. Selecção de casos de estudo e caracterização das **pressões** associadas (**P**):
  - e. Caracterização dos principais tipos de contaminantes habitualmente presentes no

- lixiviado proveniente de lixeiras.
  - f. Selecção de um conjunto de lixeiras representativas das diversas situações encontradas no País, em especial no que respeita o tipo de meio geológico: arenoso, argiloso, granítico, xistoso (será dada prioridade de selecção aos locais onde já existam infra-estruturas de monitorização).
  - g. Análise de estudos anteriores sobre o local.
  - h. Caracterização do tipo de infra-estrutura, sua geometria e dos processos de isolamento existentes.
  - i. Caracterização do tipo de resíduos depositados no local e da sua eventual alteração no tempo. Identificação da data de entrada em funcionamento e estádio actual.
  - j. Caracterização da composição média do lixiviado (tipo e concentração de contaminantes).
  - k. Análise das infra-estruturas existentes (sondagens, furos, etc.).
3. Caracterização do **estado (S)**:
- l. Análise das características principais do ambiente envolvente que podem influenciar os efeitos da dispersão de contaminantes nos solos e nas águas.
  - m. Caracterização geológica e hidrogeológica do local.
  - n. Determinação dos locais para realização de perfis de resistividade (não destrutivos) e realização dos perfis.
  - o. Execução do levantamento electromagnético de forma a detectar eventuais focos de contaminação na região e a aumentar o conhecimento da estrutura geológica e tectónica. Este tipo de levantamento deverá permitir guiar a monitorização a qualidade de solos e de águas no local uma vez que ajudará a definir as zonas preferenciais de circulação.
  - p. Definição de um plano de monitorização de solos e de águas subterrâneas em função dos resultados obtidos nos perfis de resistividade e ao modelo global de escoamento na região. O plano deverá contemplar a definição dos locais de medição do nível piezométrico e de amostragem, as suas profundidades, os parâmetros a monitorizar, as técnicas e métodos de recolha, a periodicidade de amostragem e os relatórios de monitorização a preparar, entre outros aspectos.
  - q. Execução do plano de monitorização.
  - r. Caracterização da quantidade através da caracterização da precipitação e da determinação da recarga/extracções e da monitorização da variação dos níveis piezométricos.
  - s. Caracterização da qualidade através da selecção dos parâmetros e das respectivas concentrações indiciadoras de contaminação nos vários níveis de análise: lixiviado, solos, água na zona vadosa e águas subterrâneas.
4. Análise do **impacte (I)**:
- t. Análise da facilidade de lixiviação para horizontes mais profundos e análise da



- capacidade de retenção da poluição pelos solos envolventes através de ensaios em laboratório. Modelação numérica dos ensaios realizados. Esta tarefa terá a colaboração do mestrando a trabalhar no mestrado M4 (cf. Secção 11.4).
- u. Interpretação dos resultados das análises químicas recolhidas durante os programas de monitorização e sua interpretação com base no tipo e concentração de lixiviado produzido. Identificação dos principais contaminantes presentes nas águas subterrâneas da zona envolvente.
  - v. Análise da evolução da qualidade das águas subterrâneas ao longo do tempo e da extensão das manchas de contaminação nas zonas envolventes.
  - w. Caracterização da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas da região.
  - x. Análise do risco de contaminação face ao tipo de lixiviado presente, às situações hidrogeológicas e climatéricas presentes, a idade do sistema e a vulnerabilidade do meio e sua incorporação nos Planos de Gestão de Bacia Hidrográfica. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D1 (cf. Secção 11.7).
5. Identificação de possíveis **respostas (R)**:
- y. Desenvolvimento de um modelo integrado de águas subterrâneas, incluindo aspectos de quantidade e de qualidade. Caracterização dos principais processos de transporte em lixeiras e previsão da sua evolução. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D3 (cf. Secção 11.8).
  - z. Definição das principais medidas de mitigação e/ou reabilitação tendo em vista a protecção das águas subterrâneas da zona envolvente. Análise de prioridades de actuação.
  - aa. Análise da possibilidade de extrapolar os resultados para outras situações semelhantes.

A tabela seguinte apresenta um cronograma do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	DPSIR	Designação da Tarefa	Ano 1				Ano 2				Ano 3			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	D	Identificação da força motriz	████████████████████											
2	P	Seleção de casos de estudo e caracterização das pressões associadas	████████████████████											
3	S	Caracterização do estado					████████████████████							
4	I	Avaliação do impacte					████████████████████							
5	R	Identificação de possíveis respostas									████████████████████			

#### **10.8.4 Planeamento dos meios humanos necessários**

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento do programa no LNEC são os seguintes:

- ◆ 9 meses de Investigador.
- ◆ 7 meses de Técnico Superior.
- ◆ 14 meses de Bolseiro de Doutoramento e 16 meses de Bolseiro de Mestrado (cf. Quadro 27) com formação académica de base nas áreas de geologia ou engenharia civil, ambiente, química, bioquímica. Os bolseiros, além de dominarem as matérias da sua formação de base, deverão possuir experiência na área de bioquímica, de hidrologia e hidrogeologia que complementarão com os conhecimentos e a experiência que serão adquiridos pela participação nas actividades previstas para o programa.

Para o desenvolvimento deste programa conta-se com a participação de outros sectores do LNEC no domínio da prospecção electromagnética, nomeadamente do Núcleo de Geologia de Engenharia e Geotecnia Ambiental (NGEA) do Departamento de Geotecnia.

#### **10.8.5 Benefícios esperados**

Um programa desta natureza permitirá quantificar o grau e a extensão de um problema de contaminação difusa no território nacional, cujos efeitos apenas se conhecem em casos isolados e propor metodologias adequadas à sua contenção, minimização e reabilitação. A grande quantidade deste tipo de infra-estruturas no País sem que haja uma acção concreta de análise da situação poderá comprometer o objectivo principal da Directiva das Águas Subterrâneas, de proteger as águas subterrâneas contra a contaminação e a deterioração.

Neste programa propõe-se caracterizar um número de situações que possam ser representativas das condições de deposição, climáticas e hidrogeológicas de forma a estimar o grau e a extensão deste tipo de contaminação.

## **Programa de Estudo 6 – MANAGE\_FF2**

**Domínio de aplicação: Internacional**

**Tipo de Projecto: *Interreg IV* da UE**

---

### **10.9 Minimização do efeito de cAtástrofes NAturais na qualidade das áGuas subterrâneas: Fogos Florestais**

#### **10.9.1 Enquadramento e justificação**

Os fogos florestais são um problema crescente em diversos países Europeus da zona mediterrânica apesar de todo o investimento realizado nos últimos anos tendo em vista a sua prevenção e a mitigação. Devido ao aquecimento global, a questão dos fogos na Europa poderá deixar de ser um problema estritamente da Europa Mediterrânica para vir a alastrar-se à Europa Central e do Norte.

Os fogos florestais, para além dos danos sociais e económicos que causam, têm também como resultado graves consequências ambientais para os meios: ar, solo, água, flora e fauna. Esta temática foi abordada no Capítulo 8 para os meios solo e água. Os diversos trabalhos de investigação que têm sido desenvolvidos centram-se em quatro vertentes distintas que incluem a análise de:

1. características dos fogos florestais (e.g. quantidade de energia libertada, tempo de residência, comprimento das chamas), do regime do fogo (e.g. dimensão, tempo de retorno) e das cinzas produzidas em diversos contextos de clima, topografia e geologia;
2. efeito dos fogos na flora e na fauna;
3. efeito dos fogos nas características físicas e químicas dos solos e das águas e
4. medidas de mitigação pós-fogo, no âmbito das componentes: flora, fauna, solos e águas.

Segundo Phoenix (2007) as questões-chave a serem investigadas são a avaliação da eficiência e das limitações das várias técnicas de gestão pós-fogo, a conservação do solo e da água, a recuperação da qualidade dos solos (medidas de correcção dos solos) e das suas propriedades, a reflorestação (selecção das espécies vegetais, sistemas radiculares), o solo, o escoamento superficial e a qualidade da água.

Dentro dos aspectos de qualidade dos solos e das águas (que dependem de aspectos de quantidade) há a considerar as questões relacionadas com: (1) a erosão dos solos; (2) a

alteração do ciclo da água (com alteração da capacidade de infiltração e com alteração de caudais superficiais) e (3) as alterações à qualidade dos solos e das águas.

A análise da erosão do solo pós-fogo implica a utilização de modelos de previsão. Eventos de precipitação intensa que ocorram em áreas aridas recentemente podem potenciar a erosão e o escoamento superficial, com repercussões na degradação da qualidade da água que não se limitam somente às áreas aridas.

No triângulo planta – erosão – qualidade da água (superficial e subterrânea) é fundamental perceber qual é a ligação entre os nutrientes libertados pela planta durante o incêndio (cinzas) com os solos e água.

No que diz respeito às alterações da qualidade dos solos e das águas, é necessário aumentar o conhecimento relativo aos efeitos do fogo nas propriedades químicas dos solos. A capacidade de prever a magnitude e duração de eventuais alterações à qualidade da água é ainda limitada.

Atendendo ao exposto e ao referido na Secção 8.5 sobre as necessidades de investigação neste domínio, este Programa propõe-se contribuir para aprofundar diversos aspectos sobre os efeitos dos fogos florestais na qualidade das águas subterrâneas e solos. O Programa surge na sequência de um projecto para a Fundação para a Ciência e Tecnologia, em curso entre 2005 e 2008, intitulado "Avaliação do impacto de fogos florestais nos recursos hídricos subterrâneos" (adiante designado por FCT Fogos), cujo principal objectivo foi recomendar estratégias e respostas para minimizar o efeito do impacto dos fogos florestais na quantidade e na qualidade da água, tendo para o efeito sido criada uma rede de monitorização da qualidade da água em áreas aridas e não aridas que permitiu caracterizar e avaliar a influência dos fogos florestais na degradação das águas de superfície e subterrâneas. Para atingir estes objectivos foram escolhidas quatro pequenas áreas bem definidas em relação ao coberto vegetal, solos, hidrogeologia, clima e condições de escoamento onde foram realizadas inúmeras campanhas de monitorização em diferentes meios.

Com este Programa de Estudo propõe-se utilizar o vasto conjunto de informação angariada no projecto FCT Fogos e aplicar a metodologia desenvolvida a outras regiões mediterrânicas por forma a obter informação para áreas com diferentes características de geologia, hidrogeologia e cobertura vegetal que permitam extrapolar de forma cientificamente fundamentada os dados sobre os efeitos de fogos florestais. Será incrementada a componente de modelação numérica ao nível da bacia hidrográfica, a análise da vulnerabilidade e sistemas de suporte à decisão, temas que requerem uma investigação mais aprofundada em resultado do elevado grau de incerteza e variabilidade nas respostas do meio ambiente ao fogo.

A importância e necessidades de investigação (cf. Secção 8.5) dentro desta temática de fogos florestais são claramente referidas no 7.º Programa-Quadro da UE, cujo Programa de

Trabalhos para 2009, publicado a 28 de Agosto de 2008, apresenta uma linha programática dentro do Tema 6 "Ambiente (incluindo alterações climáticas)", na Área 6.1.3.1.1 designada "Forest fires in the context of climate and social changes"<sup>5</sup>, onde parcialmente se enquadram os objectivos deste programa. O programa Interreg IV também apresenta uma linha de investigação para problemas da área do mediterrâneo onde esta temática se insere, tendo sido apresentada uma candidatura neste domínio em Julho de 2008 que aguarda resposta.

### 10.9.2 Objectivos

Os objectivos deste programa são definir metodologias para uma protecção eficaz de águas (superficiais e subterrâneas) e de solos em áreas ardidas, tendo por base um sólido conhecimento de como são afectadas pelo fogo florestal, no âmbito de uma análise integrada dos diversos factores intervenientes nesse processo ao nível da bacia hidrográfica. Este estudo dá continuidade ao projecto FCT Fogos visando robustecer a extrapolabilidade dos impactes negativos dos fogos florestais a outras bacias hidrográficas, a seleccionar no âmbito deste programa, com características geológicas, hidrogeológicas e de cobertura vegetal diferentes.

Os aspectos a analisar centram-se na componente da qualidade da água, designadamente através da análise da erosão dos solos, das alterações do ciclo da água (capacidade de infiltração, etc.) e das alterações da qualidade dos solos e das águas.

Especial ênfase será dada à componente de modelação numérica do escoamento e transporte na bacia hidrográfica, à análise da vulnerabilidade do meio à poluição e a sistemas de suporte à decisão. A criação de um Sistema de Suporte à Decisão é uma peça fundamental deste trabalho, já que constitui uma base de informação para o conhecimento dos efeitos do fogo visando a posterior protecção adequada do ambiente. Aqui pretende-se incorporar informação relativa não só às características físicas da área de estudo e das condições climáticas, como também dados provenientes da monitorização realizada que, associados a modelos de análise do escoamento e transporte, permitam uma adequada simulação da realidade e projecção de cenários para minimizar os efeitos de fogos florestais na qualidade das águas.

A elaboração do programa será efectuada para um conjunto de áreas de estudo que sejam representativas das condições em Portugal, em termos de ocupação do solo, de clima e de características físicas da área.

### 10.9.3 Metodologia proposta – linhas-mestras a desenvolver

1. Identificação de **forças motrizes** associadas ao fogo florestal e definição de casos de

---

<sup>5</sup> Os impactes esperados com os projectos são: "Enhanced capacity to assess vulnerability and risks for forest fires; improved management and prevention strategies for forest fires. Sharing common fire risk associated research to climate change across continents".

estudo:

- a. Análise crítica de situações geológicas, hidrogeológicas e de cobertura vegetal não cobertas pelo projecto FCT Fogos.
  - b. Análise de áreas susceptíveis de extrapolação em Portugal e na bacia mediterrânica de forma a minimizar as incertezas correspondentes à extrapolação dos efeitos negativos dos fogos florestais nos recursos hídricos.
  - c. Pesquisa bibliográfica sobre os resíduos do fogo em função do tipo de vegetação, dos solos e da temperatura do fogo, em complemento às análises efectuadas em estudos anteriores, designadamente o projecto FCT Fogos.
  - d. Análise dos efeitos que as alterações climáticas (temperatura, ventos, precipitação) podem ter sobre o regime de fogos na bacia.
2. Caracterização das **pressões** exercidas pelo fogo florestal:
- e. Selecção de pequenas bacias hidrográficas – ardidadas e não ardidadas – numa mesma região, cujas características geológicas, tipo de solo, e uso e ocupação do solo sejam idênticas; *i.e.* bacias onde as características intrínsecas das águas sejam à partida idênticas. As características destas áreas serão complementares às do projecto FCT Fogos. Procurar-se-á também incorporar áreas de fogos controlados.
  - f. Análise de trabalhos anteriores realizados nas áreas de estudo, inventariação da informação existente e de infra-estruturas de monitorização existentes e que possam eventualmente ser utilizadas para recolha de nova informação (solo, águas superficiais, águas subterrâneas).
  - g. Inventário de potenciais origens de contaminação na bacia e dos registos históricos de incêndios e sua relação com as forças motrizes expectáveis/existentes.
  - h. Caracterização dos locais quanto à análise da influência de factores externos (*e.g.* topografia), designadamente os parâmetros climatéricos característicos da região (temperatura, precipitação, ETP e ventos).
  - i. Identificação das características dos fogos havidos: percentagem da vegetação ardidada, tempo de reflorestação, registo histórico do fogo, frequência, intensidade, duração e extensão espacial da queima.
3. Caracterização do **estado** dos solos, águas superficiais e subterrâneas:
- j. Definição de um plano de monitorização que deverá centrar-se no controlo da qualidade das águas superficiais e subterrâneas após o fogo, e na sua continuada evolução ao longo do tempo até se atingirem os níveis de qualidade ante-fogo ou, na ausência do conhecimento destes, aos mínimos de qualidade biológica e química previstos na Directiva-Quadro da Água.
  - k. Monitorização para recolha de dados meteorológicos (precipitação, vento, ETP e temperatura), de qualidade e de quantidade das águas de escorrência, superficiais (caudais) e subterrâneas (níveis piezométricos), e quantificação da

- perda de solo.
- l. Selecção dos parâmetros físicos e químicos a analisar em função do tipo e qualidade das cinzas esperadas para o tipo de fogo e condições na área de estudo.
  - m. Identificação das alterações químicas que ocorrem no solo durante o fogo e os principais meios de dispersão dos contaminantes para as massas de água superficiais e subterrâneas.
  - n. Quantificação da erosão na bacia e das alterações na capacidade de infiltração.
  - o. Calibração e utilização de dados de detecção remota para monitorizar o conteúdo de água do solo e distribuição da vegetação.
4. Caracterização dos **impactes** dos incêndios na erosão, na quantidade e na qualidade dos solos e das águas superficiais e subterrâneas:
- p. Análise do conjunto de parâmetros físicos e químicos identificados em j. para amostras de cinzas, solos, águas superficiais e subterrâneas. Análise da evolução temporal da qualidade da água para cada tipo de parâmetro.
  - q. Construção, em SIG, um mapa de elementos químicos, que permita visualizar onde eles existem, em que meio e em que quantidades. Este tipo de mapas permite relacionar a existência de um determinado elemento químico não só com o tipo de vegetação de uma área mas também com as características físicas e topográficas dessa área.
  - r. Correlação dos factores intrínsecos do local com os factores externos, o tipo de fogo e os resultados de qualidade dos solos e águas obtidos. Esta informação pode ser estudada através de uma análise estatística multivariada, utilizando para tal uma parcela de amostragem no terreno onde se recolhem amostras de cinzas, de solo e de água (superficial e subterrânea). Será dada especial ênfase ao triângulo planta-solo-água.
  - s. Avaliação da erosão do solo e identificação das suas principais causas. Aferição com dados da bacia ardida e a de controlo.
  - t. Avaliação dos impactes do fogo florestal sobre a qualidade das águas de eventuais origens de água em função do seu uso, p.e. consumo.
  - u. Utilização de modelos que permitam simular o comportamento dos efeitos do fogo florestal na erosão e transporte de massa e sua calibração a partir dos dados recolhidos em p. Este trabalho deverá ser desenvolvido em conjunto com o doutoramento D3 (cf. Secção 11.8).
5. Avaliação de **respostas** a adoptar com vista a uma melhor gestão dos efeitos do fogo:
- v. Avaliação de medidas minimizadoras da erosão e reguladoras do ciclo hidrológico. Desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão que permitam avaliar os factores mais relevantes e auxiliar na escolha de medidas que permitam mitigar os efeitos (e.g. reflorestação, cobertura dos solos como medida anti-erosão, sistemas de barreira) bem como as áreas onde devem ser

aplicadas. Esta componente será desenvolvida em colaboração com o doutoramento D5.

- w. Identificação de metodologias de controlo da quantidade da água/infiltração adequadas a cada tipo de área arida.
- x. Avaliação de medidas destinadas a proteger a qualidade das águas, designadamente através da redução da erosão (vegetação riparia) e da utilização de espécies cujas repercussões a nível da qualidade sejam menores.
- y. Análise da extrapolabilidade das medidas de resposta identificadas para áreas com características geológicas, hidrogeológicas e de cobertura vegetal diferentes.

A Tabela seguinte apresenta um cronograma do desenvolvimento das tarefas propostas

ID	Designação da Tarefa	DPS/R	Início	Fim	Ano 1				Ano 2				Ano 3			
					Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Identificação de forças motrizes associadas ao fogo florestal e definição de casos de estudo	D	2009-01-01	06-07-2009												
2	Caracterização das pressões exercidas pelo fogo florestal	P	06-04-2009	16-07-2010												
3	Caracterização do estado dos solos, águas superficiais e subterrâneas	S	14-10-2009	08-07-2011												
4	Caracterização dos impactes dos incêndios na erosão, na quantidade e na qualidade dos solos e das águas superficiais e subterrâneas	I	07-04-2010	30-12-2011												
5	Avaliação de respostas a adoptar com vista a uma melhor gestão dos efeitos do fogo	R	21-01-2011	18-01-2013												

### 10.9.4 Planeamento dos meios humanos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento deste programa no LNEC são os seguintes:

- ◆ 9 meses de Investigador.
- ◆ 7 meses de Técnico Superior.
- ◆ 36 meses de Bolseiro de Doutoramento (cf. Quadro 27) com formação académica de base nas áreas de geologia ou engenharia civil, ambiente, química, bioquímica. Os bolseiros, além de dominarem as matérias da sua formação de base, deverão possuir formação na área de hidrologia, hidrogeologia, bioquímica, físico-química, SIG e DSS que complementarão com os conhecimentos e a experiência que serão adquiridos pela participação nas actividades previstas para o programa.

### 10.9.5 Benefícios esperados

Os fogos florestais são uma realidade que afecta cada vez mais os países mediterrânicos durante o período de Verão. Em Portugal, a série de incêndios que tem vindo a assolar as florestas nacionais nas últimas décadas, tem como consequência a sua alteração em termos de estrutura e configuração, representando ainda uma grave ameaça à qualidade das águas e



do solo, designadamente através dos efeitos da erosão. Contudo, os efeitos do fogo florestal sobre estes sistemas e a sua modelação não são ainda claramente dominados pela comunidade científica.

Com este programa pretende-se ganhar conhecimento sobre o efeito do regime de fogos e da ocupação do solo no País na afectação dos recursos água e solo, nomeadamente através de modelação numérica ao nível da bacia hidrográfica, bem como da definição de medidas e acções a tomar de forma a procurar minimizar os efeitos dos fogos florestais na qualidade e quantidade dos solos e das águas subterrâneas, com auxílio de um DSS. Pretende-se incorporar não só o novo conhecimento a adquirir com este Programa, mas também inserir os conhecimentos obtidos em trabalhos anteriores desenvolvidos por diferentes equipas de trabalho no País procurando uma análise da extrapolabilidade dos impactes negativos dos fogos florestais a outras bacias hidrográficas.

Espera-se também compreender os mecanismos de transferência de elementos químicos que ocorrem entre os meios citados e relacionar a presença destes elementos com as características da área, como por exemplo o tipo de solo e a vegetação.

**Programa de Estudo 7 – MAIA**  
**Domínio de aplicação: Internacional**  
**Tipo de Projecto: *Collaborative project* do 7.º PQ da UE**

---

---

**10.10 Metodologias de Avaliação dos Impactes das Alterações climáticas na vulnerabilidade dos aquíferos à poluição e na qualidade das águas subterrâneas. Análise de alterações de qualidade nas séries históricas de anos húmidos e secos**

**10.10.1 Enquadramento e justificação**

No Capítulo 9 analisaram-se os principais efeitos que as alterações climáticas podem ter no ciclo da água, com especial ênfase para a componente das águas subterrâneas. Essa informação foi analisada e sintetizada com base em trabalhos publicados e em projectos de investigação, muitos dos quais ainda em curso em todo o mundo e também em Portugal.

Como conclusão da análise efectuada, a secção final do Capítulo 9, Secção 9.5, aponta as principais necessidades de investigação neste domínio, destacando-se as lacunas de conhecimento existentes em termos de dados e de investigação que permitam estabelecer metodologias adequadas à análise dos impactes das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos. Realça-se, ainda, a importância de melhorar o conhecimento em relação aos modelos de alterações climáticas e às suas relações com o ciclo hidrológico para escalas que sejam relevantes aos decisores, nomeadamente em relação à interligação águas superficiais – águas subterrâneas, aos processos de recarga e ao balanço hídrico. Por outro lado, os aspectos das alterações climáticas e seus efeitos relativamente à qualidade das águas subterrâneas são uma das áreas que se encontra menos estudada a nível global e também em Portugal, sendo para tal fundamental avaliar a componente da vulnerabilidade das águas subterrâneas às alterações climáticas.

A importância desta temática vem bem espelhada no 7.º Programa-Quadro da UE, cujo Programa de Trabalhos para 2009, publicado a 28 de Agosto de 2008, apresenta uma linha programática dentro do Tema 6 "Ambiente (incluindo alterações climáticas)", na Área 6.1.1.6.1 designada "Integrated methodology providing a common platform for an improved assessment of climate change impacts, vulnerability and related cost effective adaptation measures"<sup>6</sup>, onde

---

<sup>6</sup> "The aim is to develop and apply a comprehensive and integrated methodology based on latest research results on impacts of and vulnerability to climate change and provide a common platform for the assessment of climate change impacts and vulnerability in key sectors at European level, considering as appropriate neighbouring countries. This will be applied to

se enquadram plenamente os objectivos deste programa, área essa onde o financiamento é atribuível a projectos de investigação de pequena a média escala.

### 10.10.2 Objectivos

Os objectivos deste programa são o desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação da vulnerabilidade de sistemas aquíferos às alterações climáticas, visando a sua validação na análise da variação da qualidade das águas subterrâneas em resultado da variação da recarga e dos processos de transporte de poluentes para diferentes anos hidrológicos.

Atendendo à informação histórica existente sobre a qualidade das águas subterrâneas para períodos extremos de anos húmidos e secos, aleatórios mas recorrentes, quer para Portugal quer para outros países mediterrânicos, serão analisadas eventuais tendências de qualidade observadas para esses diferentes períodos, incluindo sistemas com diferentes características de permeabilidade e de vulnerabilidade e sujeitos a condições climáticas diferentes.

A análise proposta poderá constituir um ponto de partida para o programa dos efeitos das alterações climáticas na qualidade dos recursos hídricos permitindo, eventualmente, extrapolar potenciais futuros cenários para a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. A metodologia será desenvolvida utilizando escalas que permitem comparar a vulnerabilidade às alterações climáticas e seus impactes na qualidade das águas subterrâneas.

### 10.10.3 Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver

Apresentam-se as linhas mestras do trabalho a desenvolver pela equipa do NAS para esta proposta. Caso a mesma venha a ser apresentada ao 7.º Programa-Quadro da UE, como se pretende, este trabalho será integrado numa componente mais vasta de medidas de adaptação às alterações climáticas que terá em conta aspectos socioeconómicos e de custo eficácia de medidas. Esta componente será efectuada por outras equipas do programa, com valências nestes domínios, e as metodologias a desenvolver serão elaboradas e testadas por diferentes parceiros a casos de estudo nos seus países.

A metodologia que se propõe inclui o seguinte conjunto de actividades, estruturadas de acordo com o conceito DPSIR (cf. Secção 3.5):

#### 1. Identificação da **força motriz (D)**:

---

assess the cost-effectiveness of adaptation measures to attenuate the expected impacts taking into account cross-sectoral benefits and at scales relevant for implementing adaptation measures. A significant step forward should be made here to reduce uncertainties in impact assessment and by developing a metrics which is used to ensure comparability in quantifying impacts and vulnerability.

Funding scheme: Collaborative Project (small or medium scale focused research project)."

- a. Revisão bibliográfica dos principais efeitos das alterações climáticas no ciclo hidrológico (nomeadamente através dos elementos precipitação, temperatura e evaporação/evapotranspiração).
  - b. Análise desses efeitos para escalas regionais apropriadas aos locais de estudo.
2. Selecção de casos de estudo e caracterização das **pressões** associadas (**P**):
- c. Selecção de um conjunto de áreas de estudo (sistemas aquíferos) representativas de diferentes situações climáticas e hidrogeológicas no País.
  - d. Caracterização em SIG das suas propriedades, *i.e.*, tipo de aquífero, limites geográficos, estratigrafia, piezometria, transmissividade, etc.
  - e. Definição de um conjunto de anos representativos de períodos extremos, anos húmidos e secos, para estudo. Definição de 2 períodos no ano para comparação de variáveis.
  - f. Caracterização das condições climáticas, de uso e ocupação do solo e hidrológicas históricas nesses locais.
3. Caracterização do **estado** (**S**):
- g. Caracterização das séries variáveis de quantidade para os diferentes anos: piezometria. Análise estatística e geostatística.
  - h. Caracterização das variáveis de qualidade para os diferentes anos: selecção de um conjunto de parâmetros representativos da qualidade da água e sua variação no tempo. Análise estatística e geostatística.
4. Análise do **impacte** (**I**):
- i. Desenvolvimento de metodologia para a avaliação da vulnerabilidade de sistemas aquíferos às alterações climáticas.
  - j. Aplicação da metodologia desenvolvida aos casos de estudo e mapeamento da vulnerabilidade e risco às alterações climáticas para cada um dos casos de estudo. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D1 (cf. Secção 11.7).
  - k. Análise da informação histórica sobre os aspectos qualitativos de águas subterrâneas e sua interpretação à luz do mapeamento da vulnerabilidade às alterações climáticas e do uso e ocupação do solo à data.
5. Identificação de possíveis **respostas** (**R**):
- l. Identificação de possíveis medidas de adaptação/mitigação para as áreas que se revelem mais vulneráveis às alterações climáticas, em função das variáveis mais sensíveis e da ocupação do solo. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D2 (cf. Secção 11.7).

A tabela seguinte apresenta um cronograma do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	DPSIR	Designação da Tarefa	Ano 1				Ano 2				Ano 3			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	D	Identificação da força motriz das alterações climáticas e o ciclo hidrológico	██████████											
2	P	Seleção de casos de estudo e caracterização das pressões associadas às alterações climáticas	██████████											
3	S	Caracterização do estado das águas subterrâneas: quantidade e qualidade					██████████							
4	I	Análise do impacto das alterações climáticas: Vulnerabilidade e qualidade					██████████							
5	R	Identificação de possíveis respostas									██████████			

#### 10.10.4 Planeamento dos meios humanos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento deste programa no LNEC são os seguintes:

- ◆ 9 meses de Investigador.
- ◆ 7 meses de Técnico Superior.
- ◆ 28 meses de Bolseiro de Doutoramento (cf. Quadro 27) com formação académica de base nas áreas de geologia ou engenharia civil, do ambiente, química, bioquímica. Os bolseiros, além de dominarem as matérias da sua formação de base, deverão possuir formação na área de hidrologia, hidrogeologia e hidrogeoquímica, dominar técnicas de modelação numérica, SIG e geostatística que complementarão com os conhecimentos e a experiência que serão adquiridos pela participação nas actividades previstas para o programa.

#### 10.10.5 Benefícios esperados

Os benefícios directos esperados com este programa são dois: (1) estabelecer uma metodologia de análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas às alterações climáticas e (2) avaliar o efeito que anteriores anos secos e húmidos tiveram na qualidade das águas subterrâneas procurando identificar as principais variáveis que estiveram na sua origem e a sua relação com alterações climáticas.

Este programa permitirá estabelecer metodologias de análise dos efeitos das alterações climáticas na disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos, pelo que poderá servir de suporte ao desenvolvimento de acções que visem a gestão sustentável e integrada dos recursos hídricos, nomeadamente através da adopção de medidas de adaptação (como p.e. a recarga artificial proposta num programa na Secção 10.11) apropriadamente aplicadas a áreas mais carenciadas em função das características de vulnerabilidade as alterações climáticas que apresentam.

## **Programa de Estudo 8 – IMAGINATION**

**Domínio de aplicação: Internacional**

**Tipo de Projecto: *Collaborative project* do 7.º PQ da UE**

---

---

### **10.11 Integrated Management of surface and Groundwater as a strategic response to climate chaNge impacts adaptATION in a long-term perspective**

#### **10.11.1 Enquadramento e justificação**

Em diversos países do mundo, a que Portugal não é excepção, a ocorrência de fenómenos hidrológicos extremos de seca e de cheias torna fundamental que a gestão dos recursos hídricos, superficiais e subterrâneos, seja efectuada de forma integrada e interanual, permitindo armazenar água nos períodos com excedentes para posterior uso em épocas de escassez.

As alterações climáticas vêm acentuar a ocorrência de fenómenos extremos, sendo para Portugal esperado a este propósito (cf. secções 9.2.2 e 9.3) um aumento da sazonalidade da precipitação com decréscimos mais significativos no Verão do que no Inverno, a progressiva redução do escoamento ao longo do século XXI com tendência para uma concentração do escoamento no Inverno, a diminuição da recarga e, assim, a diminuição da disponibilidade e da qualidade da água (Cunha *et al.*, 2002; 2004).

Uma resposta estratégica, de longo prazo, para adaptação e minimização de impactes resultantes das alterações climáticas, bem como de novas exigências decorrentes de um rápido crescimento populacional e/ou da economia impõe que sejam adoptadas novas metodologias de gestão do recurso que passam pelo seu uso e gestão de forma eficiente.

O armazenamento subterrâneo de água em aquíferos através da recarga artificial tem sido uma prática crescente nos últimos anos, como forma de melhorar a gestão interanual dos recursos hídricos. Esta metodologia apresenta assinaláveis vantagens, não apenas por poder recorrer a reservatórios naturais disponíveis, evitando assim a construção de infra-estruturas para armazenamento de água, mas também porque estes evitam a perda de água por evaporação e porque estão naturalmente mais protegidos de problemas de contaminação existentes à superfície permitindo a filtragem entre outras formas de remoção de contaminantes.

Nas últimas décadas observa-se um considerável investimento em processos de recarga artificial quer ao nível de projectos de investigação, geralmente de pequena escala e destinados a uma melhor compreensão das técnicas e dos processos de infiltração, quer ao

nível operacional havendo diversos casos onde se desconhecem detalhes sobre os mecanismos de recarga ou sobre eventuais contaminações dela resultantes. Há diversos projectos, por exemplo em Israel e nos EUA, com sistemas de sucesso a operar há mais de 30 anos. Exemplos do primeiro tipo de projectos podem ser encontrados na Secção 9.4 para o projecto GABARDINE e RECLAIMWATER. Em Portugal as aplicações destas técnicas podem ser encontradas em Lobo Ferreira *et al.* (2007), Oliveira (2007) e Diamantino *et al.* (2008). Exemplos do segundo tipo de projectos podem ser encontrados em diversos países de que se destaca a Tunísia, a Coreia, entre muitos outros.

A importância e necessidades de investigação (cf. Secção 9.5) dentro desta temática de gestão integrada atendendo aos efeitos das alterações climáticas são claramente referidas no 7.º Programa-Quadro da UE, cujo Programa de Trabalhos para 2009, publicado a 28 de Agosto de 2008, apresenta uma linha programática dentro do Tema 6 "Ambiente (incluindo alterações climáticas)", na Área 6.2.1.2.1 designada "Water management and climate change impacts in the long-term perspective"<sup>7</sup>, onde se enquadram os objectivos deste programa. A área permite financiar projectos de investigação de pequena a média escala.

### 10.11.2 Objectivos

Os objectivos deste programa são desenvolver estratégias de gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos que permitam constituir opções a longo prazo de mitigação e de adaptação aos efeitos das alterações climáticas, de forma ambientalmente adequada e equilibrada do ponto de vista do custo-eficácia e social.

De entre as várias opções a considerar no programa, a análise de técnicas de recarga artificial de aquíferos para posterior captação em períodos de seca, para abastecimento e regadio, será uma das estratégias a analisar, com particular ênfase para o conhecimento das potencialidades da zona vadosa na melhoria da qualidade da água de recarga. Procura-se, dessa forma, que os aspectos de gestão sustentável do recurso do ponto de vista quantitativo possam estar ligados à preservação da qualidade através da utilização de capacidades naturais do meio subterrâneo e da zona vadosa.

O programa integrará diversos casos de estudo sobre recarga artificial em curso em diferentes países através de projectos de investigação procurando ampliá-los para projectos de

---

<sup>7</sup> "The project is for long-term assessment and modeling of the impacts of climate change on the hydro-chemical, hydrological and ecological processes and dynamics in river basins and associated wetlands, with a view of developing appropriate mitigation, adaptation and restoration strategies as well as adaptive and cost-effective water resource management options. The project should address climate change impacts on freshwater and wetland biodiversity (species distributional patterns, conservation status), on water quality and quantity, reference conditions and ecological thresholds for different water body types, across the various European eco-regions and climatic gradients and under a broad range of environmental conditions (in particular land-use and land-management regimes). Appropriate ecological indicators and vulnerability assessment methodologies to climate change should be developed.

Funding scheme: Collaborative Project (large scale integrating project)."

demonstração a uma escala piloto. A monitorização, quantificação, modelação e compreensão detalhada dos processos de recarga e dos seus efeitos a nível da quantidade e da qualidade das águas servirá de base para a elaboração de um Sistema de Suporte à Decisão e para a optimização de processos e procedimentos mais adequados tendo em vista maximizar a entrada de água no sistema, em função do clima e/ou da água disponível, e simultaneamente proteger a qualidade das águas subterrâneas.

### 10.11.3 Metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver

Apresenta-se a metodologia proposta para o trabalho a desenvolver pela equipa do NAS para esta proposta. Caso a mesma venha a ser apresentada ao 7.º Programa-Quadro da UE, como se pretende, esta componente do trabalho será integrada num conjunto mais vasto de estratégias de gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos que serão analisadas para os diversos países envolvidos e que serão seleccionadas em função das suas características climáticas e hidrogeológicas e do tipo de água disponível para recarga.

A metodologia que se propõe inclui o seguinte conjunto de actividades, estruturadas de acordo com o conceito DPSIR (cf. Secção 3.5):

1. Identificação da **força motriz (D)**:
  - b. Análise dos principais efeitos das alterações climáticas no ciclo hidrológico (precipitação, temperatura e evaporação/evapotranspiração).
  - c. Análise desses efeitos para escalas regionais apropriadas aos locais de estudo.
  - d. Identificação de factores, actuais e espectáveis, que possam causar pressão nos recursos, tais como o aumento populacional, turismo, agricultura, poluição.
  
2. Selecção de casos de estudo e caracterização das **pressões** associadas (**P**):
  - e. Quantificação das potenciais pressões nos recursos, em termos de volumes de água necessários para as actividades previstas e identificação de actividades susceptíveis de causar poluição e tipo de contaminação associada.
  - f. Inserção da informação sobre o uso e ocupação do solo em SIG.
  - g. Delimitação dos locais onde se verificam as maiores pressões em termos do uso e ocupação do solo e/ou de extracções.
  
3. Caracterização do **estado (S)**:
  - h. Compilação da informação existente sobre águas subterrâneas: geologia; logs de furos com as formações atravessadas; resultados de ensaios de bombagem (permeabilidade); extracções; níveis piezométricos; qualidade da água; etc.
  - i. Caracterização da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição.
  - j. Quantificação da recarga natural.
  - k. Estudo das propriedades físicas, químicas e biológicas dos vários horizontes do solo que constituem a zona vadosa e análise da sua capacidade de infiltração e



de retenção de poluentes.

- l. Desenvolvimento de um modelo integrado de águas subterrâneas, incluindo aspectos de quantidade e de qualidade. Caracterização das principais linhas de escoamento subterrâneo e da qualidade das águas subterrâneas para diferentes anos e épocas.
- m. Construção de bases de dados regionais para inserção da informação em SIG sobre uso e ocupação do solo, balanços hídricos (recarga natural e artificial, extracções), características dos solos e geologia, dados hidrogeológicos de quantidade e de qualidade.

4. Análise do **impacte (I)**:

- n. Análise do impacte e da eficácia da recarga artificial nos diferentes casos de estudo dos países envolvidos, através da identificação da superfície piezométrica sazonal, em função dos volumes da água de recarga, e da qualidade das águas subterrâneas subjacentes.
- o. Utilização do modelo matemático regional referido em l. para calibrar a resposta, local e regional, do aquífero em termos de piezometria, e de qualidade da água, em função dos volumes de recarga artificial aplicados ao aquífero e da qualidade da água de recarga e da água do aquífero.
- p. Modelação da resposta do aquífero a diversos cenários de recarga artificial.

5. Identificação de possíveis **respostas (R)**:

- q. Quantificação das necessidades de água em cada local e da sua sazonalidade.
- r. Estudo de possíveis origens de água para a recarga artificial, de forma a dar resposta às necessidades de cada local de estudo.
- s. Determinação do/dos método/os de recarga artificial mais adequados a implementar no local (bacias de infiltração, furos, etc.), em função da vulnerabilidade à poluição, das zonas de infiltração máxima, da necessidade de não causar intrusão marinha em zonas costeiras, da disponibilidade de terreno, etc. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D2 (cf. Secção 11.7).
- t. Optimização dos volumes de recarga mais adequados às características de permeabilidade dos locais e à capacidade de armazenamento (considerando a permeabilidade vertical, níveis piezométricos, etc.), em função dos volumes de água disponíveis.
- u. Avaliação da adequabilidade dos locais de recarga artificial e selecção de outros potenciais locais para instalação de recarga artificial, tendo em consideração as condições locais em termos geológicos e hidrogeológicos, disponibilidade de água e procura de água.
- v. Análise da adequabilidade dos solos da bacia para reter poluentes através da recolha de dados de qualidade ao longo de um perfil do solo, na fracção do solo e na água da zona vadosa.

- w. Análise da evolução da capacidade de retenção de poluentes pelo solo e estimativa do tempo de vida útil dos mesmos.
- x. Optimização dos métodos de recarga artificial e da sua gestão que melhor conduzam à sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, tanto do ponto de vista da sua quantidade como da qualidade. Recurso a DSS. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D4 (cf. Secção 11.9).
- y. Implementação a uma escala de demonstração dos métodos de recarga artificial seleccionados como a melhor escolha (ampliando os existentes ou aplicando outros em novos locais) e monitorização da sua eficácia.

A tabela seguinte apresenta um cronograma do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	DPSIR	Designação da Tarefa	Ano 1				Ano 2				Ano 3			
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	D	Análise dos principais efeitos das alterações climáticas no ciclo hidrológico	██████████											
2	P	Quantificação das potenciais pressões nos recursos, em termos de quantidade e de qualidade	████████████████████											
3	S	Caracterização do Estado					████████████████████							
4	I	Análise do impacte e da eficácia da recarga artificial nos casos de estudo dos países envolvidos					████████████████████							
5	R	Optimização dos métodos de recarga artificial e da sua gestão. Implementação a uma escala de demonstração					████████████████████							

O programa incluirá a análise de impactes sociais das diferentes opções de gestão em termos de equidade para os diferentes utilizadores actuais e futuros, bem como em termos das implicações possíveis para a saúde humana derivadas do uso de água de recarga de menor qualidade, p.e. proveniente de estações de tratamento, embora estes aspectos não sejam analisados pelo NAS.

#### 10.11.4 Planeamento dos meios humanos necessários

Os recursos humanos previstos para o desenvolvimento deste programa no LNEC são os seguintes:

- ◆ 10 meses de Investigador.
- ◆ 7 meses de Técnico Superior.
- ◆ 38 meses de Bolseiro de Doutoramento (cf. Quadro 27) com formação académica de base nas áreas de engenharia civil, do ambiente, geologia ou bioquímica. Os bolseiros, além de dominarem as matérias da sua formação de base, deverão possuir formação na área de modelação numérica, SIG, DSS, hidrogeologia e hidrogeoquímica que complementarão com os conhecimentos e a experiência que serão adquiridos pela participação nas actividades previstas para o programa.

### **10.11.5 Benefícios esperados**

O benefício de um programa de demonstração desta natureza é contribuir para o estabelecimento de metodologias de gestão conjunta dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais, adequadas não só às actuais condições climatológicas e de escoamento/recarga, mas também que enquadrem as alterações esperadas para o ciclo hidrológico como resultado de alterações climáticas.

Serão estudadas situações muito diversas, e em vários países, onde se analisa o uso conjunto de águas subterrâneas e superficiais através do seu armazenamento em situações de excedente hídricos (cheias, água de estações de tratamento, etc.) para poder vir a utilizá-los em épocas de escassez. Particular ênfase será dada ao uso de métodos de recarga artificial. Pretende-se que o conjunto de informação e de dados permitam estabelecer uma metodologia global para a selecção de estratégias eficazes para a adaptação e minimização dos efeitos das alterações climáticas na quantidade e qualidade dos recursos disponíveis, atendendo às características específicas de cada local.



## PARTE B - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

### GESTÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM PORTUGAL

Contributos para um Bom estado em 2015



## 11 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

---

### 11.1 Considerações iniciais

O Programa de Pós-graduação que se apresenta na Parte B deste trabalho destina-se a colmatar as necessidades de investigação identificadas no Programa de Investigação (Parte A deste documento) e as oportunidades de formação daí decorrentes, designadamente atendendo aos objectivos do Programa de Estudos apresentados no Capítulo 10.

Explicita-se e delinea-se as oportunidades de formação criadas através da apresentação das linhas-mestras de Programas de Pós-graduação que incluem dissertações de mestrado e teses de doutoramento que se pretende venham a ser desenvolvidas no âmbito dos projectos. Optou-se por não considerar programas de estágio para jovens licenciados (também previstos no Doc. CC 113-03 do Conselho Científico sobre a interpretação do "Conteúdo do programa de pós-graduação a integrar nas provas de habilitação para o exercício de funções de coordenação científica", cf. <http://www-int.lnec.pt/CC/CC-Web/CC-Home.htm>) dado que, com

as alterações do actual enquadramento para implementação do acordo de Bolonha, a grande maioria dos jovens licenciados das universidades terão já o mestrado integrado no 2.º Ciclo não se justificando a realização de um estágio.

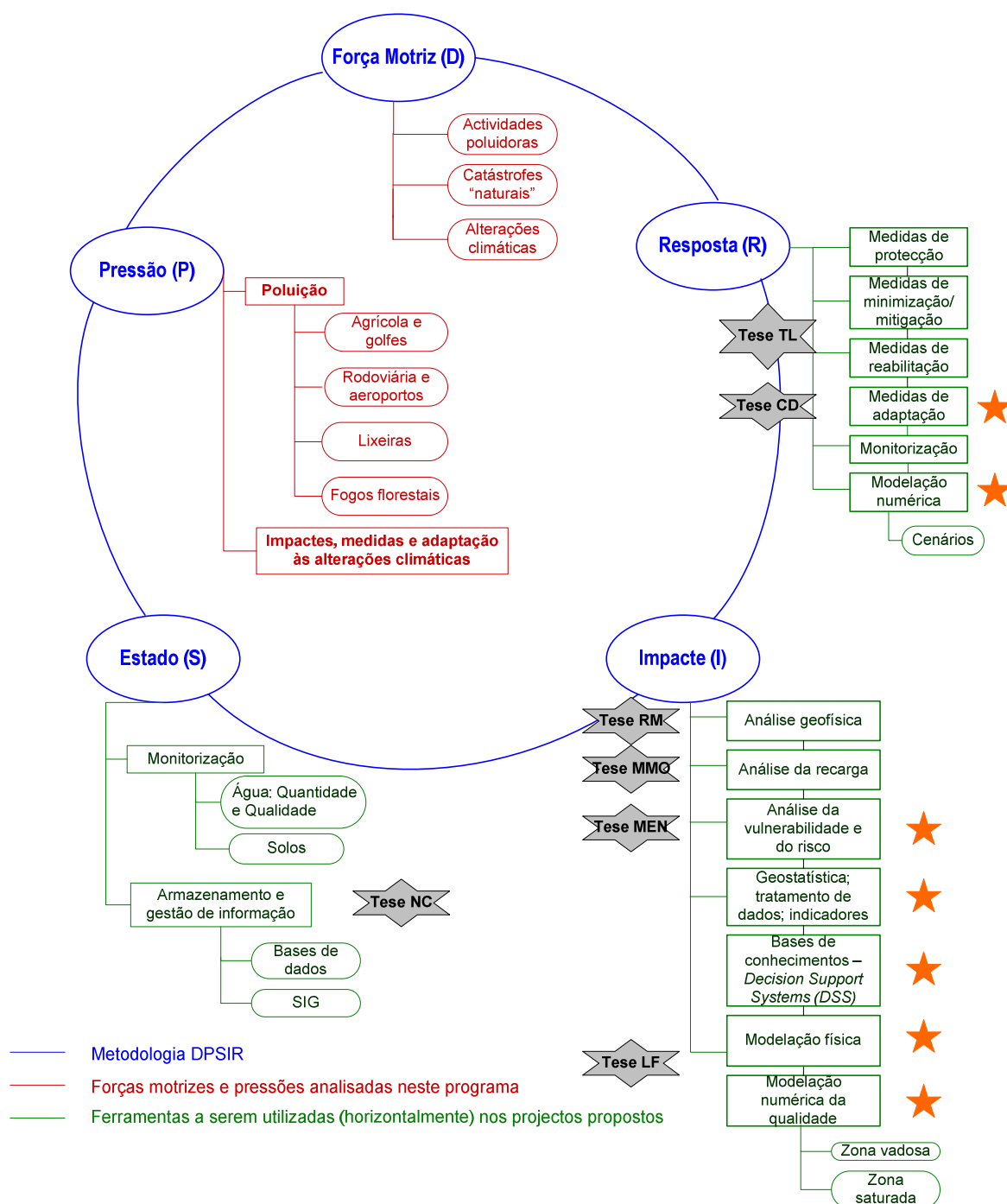
Propõe-se a realização de quatro dissertações de mestrado e de quatro teses de doutoramento para o período de oito anos previsto para a elaboração deste Programa. As áreas de pós-graduação seleccionadas cobrem a modelação física e numérica, bem como um conjunto de metodologias de análise que incluem o desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão, de análise do risco e de metodologias de mitigação e de adaptação, entre outros temas. As dissertações de mestrado correspondem à elaboração de trabalhos por um período de um ano em que se visa: (**Modelo 1**) aplicar um conjunto de metodologias e de ferramentas desenvolvidas no NAS para a análise e desenvolvimento de um dos Programas de Estudos (cf. Capítulo 10); ou (**Modelo 2**) aprofundar uma metodologia de abordagem e aplicá-la a um ou mais Programas de Estudos (cf. Capítulo 10). As teses de doutoramento correspondem à criação de metodologias e de ferramentas inovadoras a nível internacional em áreas onde o NAS necessita de investimento a curto prazo e sua aplicação prática e validação em diversos Programas de Estudos propostos no Capítulo 10. Prevê-se 4 anos para a sua realização.

O Modelo 2 das dissertações de mestrado e as teses de doutoramento não pretendem responder directamente a um projecto por si só, mas criar domínios de especialidade que permitam aos candidatos aprofundar conhecimentos numa determinada área que seja útil em vários projectos e criar o seu próprio nicho de conhecimento. Esta estratégia vem no seguimento do que já vem sendo prática no NAS nas teses de doutoramento desenvolvidas ou em desenvolvimento (caso de Catarina Diamantino em 2008), *i.e.* desenvolvimento de novas metodologias e sua aplicação em diferentes projectos. Como se pode verificar da Fig. 56, há um conjunto de domínios de eleição que deram origem a teses no NAS e também a teses noutros núcleos cuja aplicação é de interesse para o sector, como o caso da tese em curso de Nuno Charneca sobre SIG e a Directiva-Quadro da Água e a tese concluída de Rogério Mota sobre geofísica cuja aplicação ao domínio da hidrogeologia tem ocorrido para diversos projectos, nacionais e internacionais, em curso no NAS.

Atendendo ao exposto procurou-se analisar quais as áreas com maior carência de investimento em investigação para a próxima década no NAS, na sequência do que foi realizado no Programa de Habilitação anterior do NAS (Lobo Ferreira, 2000). Identificou-se a importância e aplicabilidade dos oito Programas de Pós-graduação, desenvolvidos ao longo das secções seguintes, para os Programas de Estudos referidos no Capítulo 10. O Quadro 27 apresenta os resultados deste exercício de cruzamento de informação.

Os custos apresentados são relativos exclusivamente à actividade dos bolseiros, ou seja a sua própria bolsa, as missões e deslocações no País que façam e consumíveis e outros; não se consideram os gastos nos projectos em que ficarão envolvidos. Os montantes relativos à actividade de bolseiros, de mestrado ou de doutoramento, foram calculados com base no

Regulamento das Bolsas LNEC de Investigação Científica (Aviso n.º 3089/2004, 2.ª série), i.e. 1 220 € para bolsas de mestrado e 1 610 € para bolsas de doutoramento. Considerou-se um ano para mestrado (14 640 €) e quatro anos para doutoramento (77 280 €).



Identificação das pessoas - NAS/DHA: LF - Lobo Ferreira; TL - Teresa Leitão; MMO - Manuel M. Oliveira; MEN - Maria Emília Novo; CD - Catarina Diamantino; NGEA/DG: RM - Rogério Mota; NTI/DHA: NC - Nuno Charneca.

Fig. 56 - Representação esquemática das forças motrizes e pressões analisadas e das ferramentas horizontais a utilizar nos Programas de Estudos e de Pós-graduação e sua ligação a teses de doutoramento desenvolvidas no LNEC (estrelas cinza) e a novas áreas a desenvolver com mestrados e doutoramentos (estrelas laranja)

Quadro 27 - Lista dos Programas de Estudos e sua inter-relação com os Programas de Pós-graduação (n.º de horas de mestrado e de doutoramento em cada Programa)

P	Designação abreviada dos Programas de Estudos	Designação abreviada das áreas de Pós-graduação →	M1 Sustentabilidade; águas residuais; rega de golfe	M2 Zonas sensíveis aos poluentes rodoviários	M3 Impacte de lixeiras; medidas mitigadoras	M4 Ensaio laboratoriais; parâmetros hidrogeol.	D1 Análise do risco em águas subterrâneas	D2 Mitigação e adaptação; alterações climáticas	D3 Modelação numérica ao nível da bacia hidrográfica	D4 Bases de conhecimentos e DSS
P1	<b>SUSTBASIN</b>	Sustainable rural land use planning and management at <u>basin</u> scale: towards groundwater protection from <b>diffuse pollution</b>				4	9		12	8
P2	<b>AMBIGOLFE</b>	Sustentabilidade <u>ambiental</u> do uso de águas residuais para rega de campos de <b>golfe</b>	12			4	9	5	6	4
P3	<b>AVAL AERO</b>	<u>Avaliação</u> da poluição de águas subterrâneas e de solos em áreas envolventes de <b>aeroportos</b>					8	3		
P4	<b>ID ROADS</b>	<u>Identification</u> and protection of water bodies sensitive to pollution from <b>roads</b>		12						12
P5	<b>MILQAS</b>	<u>Minimização</u> do <u>impacte</u> de <b>lixeiros</b> na qualidade das águas subterrâneas			12	4	8		6	
P6	<b>MANAGE_FF2</b>	<u>Minimização</u> do efeito de <u>catástrofes naturais</u> na qualidade das águas subterrâneas: <b>fogos florestais</b>							24	12
P7	<b>MAIA</b>	<u>Metodologias</u> de <u>avaliação</u> dos <u>impactes</u> das <b>alterações climáticas</b> na vulnerabilidade dos aquíferos à poluição e na qualidade das águas subterrâneas					14	14		
P8	<b>IMAGINATION</b>	<u>Integrated management</u> of surface and groundwater as a strategic response to <b>climate change</b> impacts <u>adaptation</u> in a long-term perspective						26		12



## **11.2 Mestrado 1 - Sustentabilidade ambiental do uso de águas residuais para rega de campos de golfe, à luz das exigências da Directiva-Quadro para a qualidade da água**

### **11.2.1 Objectivos**

Esta dissertação de mestrado insere-se no Modelo 1 de mestrados, referido na secção anterior, pelo que visa aplicar um conjunto de metodologias e de ferramentas desenvolvidas no NAS para a análise e o desenvolvimento, neste caso, do Programa de Estudo P2 "Sustentabilidade ambiental do uso de águas residuais para rega de campos de golfe". O tema proposto constitui uma área por explorar em Portugal, pelo que os resultados a obter constituem uma mais-valia com evidente interesse para um tema de mestrado e para o País, atendendo ao forte desenvolvimento actual (69 campos de golfe no País) e futuro esperado para esta actividade de turística de elevada importância económica.

O objectivo desta dissertação é analisar a situação real em Portugal em relação à qualidade dos solos e das águas subterrâneas nas áreas dos campos de golfe, em especial em áreas regadas com águas residuais tratadas, e avaliar se a sua qualidade, actual e esperada, é compatível com os aspectos de sustentabilidade ambiental dos recursos hídricos exigidos na Directiva-Quadro da água, *i.e.* Bom estado das águas (químico e quantitativo) em 2015.

Para o efeito será analisado o estado de qualidade dos solos e das águas em campos de golfe irrigados com águas residuais tratadas, por comparação com outros tipos de irrigação, e será avaliada a sua sustentabilidade a longo prazo do ponto de vista da protecção da qualidade das águas subterrâneas contra a poluição e deterioração, de acordo com o disposto no Decreto-Lei n.º 208/2008, de 28 de Outubro que transpõe a Directiva das Águas Subterrâneas.

### **11.2.2 Linhas-mestras a desenvolver e cronograma**

As linhas-mestras das actividades a desenvolver no âmbito desta dissertação são as seguintes:

- ◆ Revisão bibliográfica sobre a problemática da utilização de águas não convencionais (de menor qualidade) para rega de campos de golfe, designadamente de águas residuais tratadas.
- ◆ Identificação dos campos de golfe em Portugal com e sem utilização de águas residuais para rega e selecção de locais de estudo.
- ◆ Desenvolvimento dos casos de estudo através da análise das principais pressões e

estado:

- Inventariação do volume de água aplicada e suas características físicas, químicas e biológicas. Determinação da carga poluente associada à rega por área.
  - Identificação dos locais de irrigação com maior interesse de análise face aos processos de rega (locais com maior aplicação de água, fertilizantes e pesticidas).
  - Caracterização global das áreas quanto ao clima, tipo de solos, geologia e hidrogeologia, qualidade e quantidade das águas subterrâneas, identificação de infra-estruturas de águas subterrâneas que possam vir a servir para a monitorização.
  - Definição de um plano de monitorização que inclua todos os meios de interesse (solos, zona vadosa, zona saturada, águas superficiais) e que contemple a definição dos locais de amostragem (também em profundidade), dos parâmetros a monitorizar, das técnicas e métodos de recolha, da periodicidade de amostragem e dos relatórios de monitorização a preparar, entre outros aspectos.
  - Caracterização do balanço hídrico, *i.e.* recarga/extracções e a avaliação da variação dos níveis piezométricos.
  - Caracterização da qualidade através da selecção dos parâmetros e das respectivas concentrações indicadoras de contaminação nos vários níveis de análise: água residual tratada, relva, solos, água na zona vadosa e águas subterrâneas.
- ◆ **Análise dos principais impactes:**
    - Análise e interpretação dos resultados obtidos nas parcelas experimentais ao longo do tempo e nos vários meios monitorizados.
    - Estudo da migração de águas residuais através dos solos recolhidos em determinadas áreas dos campos de golfe analisados. Análise da facilidade de lixiviação para horizontes mais profundos e análise da capacidade de retenção da poluição pelos solos envolventes. Modelação numérica dos ensaios realizados. Esta tarefa terá a colaboração do mestrando a trabalhar no mestrado M4 (cf. Secção 11.4).
    - Modelação matemática do escoamento e transporte de massa quer na zona vadosa quer na zona saturada. A modelação da zona saturada tem por objectivo a projecção de cenários da evolução da qualidade da água para as décadas seguintes, partindo do pressuposto que a qualidade da água de rega se mantenha. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D3 (cf. Secção 11.8).
  - ◆ **Análise de possíveis respostas para o caso de estudo:**
    - Identificação dos riscos associados à utilização de águas residuais para rega de

campos de golfe na qualidade das águas de jusante, *i.e.* contaminação de águas subterrâneas e de solos. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D1 (cf. Secção 11.6).

- Identificação de medidas complementares de gestão do uso da água e optimização dos procedimentos de rega, visando para atingir melhor qualidade dos solos e das águas a jusante.

◆ Redacção da dissertação.

A tabela seguinte apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	Designação da Tarefa	Ano 1			
		Q1	Q2	Q3	Q4
1	Revisão bibliográfica sobre a problemática da utilização de águas não convencionais (de menor qualidade) para rega de campos de golfe	[Barra de progresso]			
2	Identificação dos campos de golfe em Portugal com e sem utilização de águas residuais para rega e selecção de locais de estudo	[Barra de progresso]			
3	Desenvolvimento do caso de estudo através da análise das principais pressões e estado	[Barra de progresso]			
4	Análise dos principais impactes	[Barra de progresso]			
5	Análise de possíveis respostas para o caso de estudo	[Barra de progresso]			
6	Redacção da dissertação	[Barra de progresso]			

### 11.2.3 Custos

Os custos directamente associados à realização desta dissertação de mestrado são os seguintes:

<b>Bolsa de Mestrado</b>	14 640.00 €
<b>Missões e deslocações no País</b>	2 000.00 €
<b>Consumíveis e outros</b>	600.00 €
<b>TOTAL</b>	<b>17 240.00 €</b>

## **11.3 Mestrado 2 - Identificação e protecção de massas de água sensíveis à poluição de estradas**

### **11.3.1 Objectivos**

A necessidade de construção de novas estradas tem que atender ao facto de que não é possível, nem desejável, que se proceda ao tratamento de todas as águas de escorrência nela formadas. Nesse contexto torna-se necessário definir as áreas (solos e massas de água) que, pelas suas características intrínsecas, são mais sensíveis a este tipo de poluição e que, por isso, precisam de protecção. Na definição dessas zonas sensíveis há, ainda, que atender a imposições da legislação relativas a zonas de protecção especial de diversa ordem.

O objectivo desta dissertação é propor uma metodologia de identificação e de classificação de massas de água sensíveis à poluição rodoviária que possa vir a ser usada quer a nível nacional quer a nível internacional, pelo que deverá ser compatível com as restrições dos diversos países envolvidos. Pretende-se propor um conjunto de procedimentos transparentes que permitam proteger áreas mais sensíveis a este tipo de poluição, contribuindo para promover a realização futura de infra-estruturas rodoviárias sustentáveis que considerem a protecção dos recursos hídricos, tal como vem preconizado na Directiva-Quadro da água e na Directiva das Águas Subterrâneas.

Esta dissertação de mestrado insere-se no Modelo 1 de mestrados, referido na secção anterior, pelo que visa aplicar um conjunto de metodologias e de ferramentas desenvolvidas no NAS, neste caso, para a análise e o desenvolvimento do Programa de Estudo P4.

### **11.3.2 Linhas-mestras a desenvolver e cronograma**

As linhas-mestras das actividades a desenvolver no âmbito desta dissertação são as seguintes:

- ◆ Revisão bibliográfica da literatura sobre definição de zonas sensíveis a poluentes rodoviários, incluindo manuais de procedimentos de protecção ambiental para diferentes países Europeus e outros países envolvidos no Programa de Estudo P4.
- ◆ Identificação dos factores de sensibilidade e dos descritores a atender:
  - Selecção de critérios para a definição e selecção dos factores de sensibilidade e dos descritores a serem considerados, com base na experiência de cada país.
  - Análise das características do meio envolvente e demais descritores com interesse como a geologia, propriedades do solo, vegetação, uso e ocupação do solo, topografia, condições climáticas (regime de precipitação, intensidade, características sazonais), etc.

- Identificação das propriedades físicas e químicas a ponderar para as massas de água receptoras (e.g. volume de água da massa de água receptora, permeabilidade das formações geológicas receptoras, capacidade de degradação do meio, etc.) e para as características ecológicas do meio receptor.
  - Análise das restrições legislativas comuns e de cada país na definição de zonas sensíveis (e.g. Natura 2000).
  - Elaboração de uma base de dados de conhecimento com toda a informação recolhida.
- ◆ Elaboração de um processo de decisão para definição de zonas sensíveis aos poluentes rodoviários, em formato de diagrama de decisão, e sua aplicação a um conjunto de casos de estudo:
    - Preparação de um diagrama de decisão (com base na informação da base de conhecimentos) que permita conduzir à definição de uma determinada área como sensível ou não, sendo as primeiras as áreas onde será necessário aplicar medidas de protecção.
    - Aplicação da metodologia definida a um conjunto de casos de estudo em diferentes países onde possam ser consideradas diferentes condições e *layers* de informação permitindo:
      - Estabelecer a necessidade de protecção no caso de infra-estruturas existentes; e
      - Definir a sensibilidade de massas de água à poluição de estradas.
  - ◆ Análise de medidas de minimização e protecção para classes definidas como sensíveis à poluição rodoviária e definição de uma análise de custo-benefício:
    - Identificação das principais medidas de minimização da poluição rodoviária, em termos de prevenção na origem, percurso e destino.
    - Definição de uma metodologia para a classificação dos principais factores a serem considerados numa análise custo-benefício utilizando um sistema de suporte à decisão (DSS). Esta componente será desenvolvida em colaboração com o Programa de Pós-graduação M5.
  - ◆ Redacção da dissertação.

A tabela seguinte apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	Designação da Tarefa	Ano 1			
		Q1	Q2	Q3	Q4
1	Revisão bibliográfica da literatura sobre definição de zonas sensíveis a poluentes rodoviários	[Progress bar]			
2	Identificação dos factores de sensibilidade e dos descritores a atender	[Progress bar]			
3	Elaboração de um processo de decisão para definição de zonas sensíveis aos poluentes rodoviários, em formato de diagrama de decisão, e sua aplicação a um conjunto de casos de estudo	[Progress bar]			
4	Análise de medidas de minimização e protecção para classes definidas como sensíveis à poluição rodoviária e definição de uma análise de custo-benefício	[Progress bar]			
5	Redacção da dissertação	[Progress bar]			

### 11.3.3 Custos

Os custos directamente associados à realização desta dissertação de mestrado são os seguintes:

<b>Bolsa de Mestrado</b>	14 640.00 €
<b>Missões e deslocações no País</b>	2 000.00 €
<b>Consumíveis e outros</b>	600.00 €
<b>TOTAL</b>	<b>17 240.00 €</b>

## **11.4 Mestrado 3 - Caracterização do impacte de lixeiras na qualidade das águas subterrâneas em Portugal. Análise de medidas mitigadoras da contaminação**

### **11.4.1 Objectivos**

A existência de antigas lixeiras no nosso País onde são diariamente produzidos lixiviados, cuja migração para horizontes mais profundos no solo se desconhece ao certo, necessita que se faça um investimento a nível nacional para a caracterização desta situação. Tratam-se de antigos depósitos de resíduos sólidos urbanos (RSU), inventariados em 1998 para Portugal Continental como sendo 341 (MA, 1998). Estas lixeiras foram encerradas no final dos anos 90 embora este encerramento se tenha limitado a isolar a superfície dos referidos depósitos, pelo que a produção do lixiviado, embora muito mais reduzida, continua a existir neste sistemas como resultado dos processos de decomposição dos resíduos aí presentes.

Os objectivos desta dissertação centram-se na caracterização ambiental, em termos de solos e de águas subterrâneas, das áreas de antigas lixeiras de RSU no nosso País. Pretende-se avaliar o risco deste tipo de infra-estruturas para o ambiente, o tipo de contaminantes a elas associado, a extensão da contaminação e os principais processos de contenção/reabilitação a considerar de forma a que não fique comprometido o objectivo principal da Directiva das Águas Subterrâneas, de proteger as águas subterrâneas contra a contaminação e a deterioração.

Esta dissertação de mestrado insere-se no Modelo 1 de mestrados, referido na secção anterior, pelo que visa aplicar um conjunto de metodologias e de ferramentas desenvolvidas no NAS, neste caso para a análise e o desenvolvimento do Programa de Estudo P5.

### **11.4.2 Linhas-mestras a desenvolver e cronograma**

As linhas-mestras das actividades a desenvolver no âmbito desta dissertação são as seguintes:

- ◆ Revisão bibliográfica sobre a problemática da contaminação em lixeiras e aterros de resíduos sólidos urbanos. Análise de situações equivalentes de encerramento de lixeiras noutros países.
- ◆ Análise geral da informação existente sobre lixeiras no País e selecção de um caso de estudo:
  - Tipo de resíduos, datas de funcionamento, processos de deposição, data de encerramento, entre outros.
  - Selecção de um caso de estudo que permita desenvolver uma metodologia de abordagem a utilizar para outras avaliações.

- ◆ Desenvolvimento de um caso de estudo através da análise das principais pressões e estado:
  - Análise de estudos anteriores sobre o local e caracterização do tipo de infraestrutura, sua geometria e de eventuais processos de isolamento existentes.
  - Caracterização do tipo de resíduos depositados no local e da sua eventual alteração no tempo. Identificação da data de entrada em funcionamento e estágio actual.
  - Caracterização da composição média do lixiviado (tipo e concentração de contaminantes).
  - Análise das infra-estruturas existentes (sondagens, furos, etc.).
  - Caracterização geológica e hidrogeológica do local.
  - Levantamento electromagnético de forma a detectar eventuais focos de contaminação na região e a aumentar o conhecimento da estrutura geológica e tectónica.
  - Definição de um plano de monitorização de solos e de águas subterrâneas em função dos resultados obtidos nos perfis de resistividade e do modelo global de escoamento na região.
  - Caracterização da quantidade através da caracterização da precipitação e da determinação da recarga/extracções e da monitorização da variação dos níveis piezométricos.
  - Caracterização da qualidade através da selecção dos parâmetros e das respectivas concentrações indiciadoras de contaminação nos vários níveis de análise: lixiviado, solos, água na zona vadosa e águas subterrâneas.
  
- ◆ Análise dos principais impactes:
  - Análise da facilidade de lixiviação para horizontes mais profundos e análise da capacidade de retenção da poluição pelos solos envolventes através de ensaios em laboratório. Modelação numérica dos ensaios realizados. Esta tarefa terá a colaboração do mestrando a trabalhar no mestrado M4.
  - Interpretação dos resultados das análises químicas recolhidas durante os programas de monitorização e sua interpretação com base no tipo e concentração de lixiviado produzido. Identificação dos principais contaminantes presentes nas águas subterrâneas da zona envolvente.
  - Caracterização da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas da região.
  - Análise do risco de contaminação face ao tipo de lixiviado presente, às situações hidrogeológicas e climatéricas presentes, a idade do sistema e a vulnerabilidade do meio. Este trabalho deverá ser desenvolvido em parceria com o doutoramento D1 (cf. Secção 11.6).
  
- ◆ Identificação de possíveis respostas:



- Análise do risco de poluição e sua incorporação nos Planos de Gestão de Bacia Hidrográfica.
- Definição das principais medidas de mitigação e/ou reabilitação tendo em vista a protecção das águas subterrâneas da zona envolvente. Análise de prioridades de actuação.

◆ Redacção da dissertação.

A tabela seguinte apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	Designação da Tarefa	Ano 1			
		Q1	Q2	Q3	Q4
1	Revisão bibliográfica sobre a problemática da contaminação em lixeiras e aterros de resíduos sólidos urbanos	[Barra de progresso]			
2	Análise geral da informação existente sobre lixeiras no País e seleção de um caso de estudo	[Barra de progresso]			
3	Desenvolvimento de um caso de estudo através da análise das principais pressões e estado	[Barra de progresso]			
4	Análise dos principais impactes	[Barra de progresso]			
5	Identificação de possíveis respostas	[Barra de progresso]			
6	Redacção da dissertação	[Barra de progresso]			

### 11.4.3 Custos

Os custos directamente associados à realização desta dissertação de mestrado são os seguintes:

<b>Bolsa de Mestrado</b>	14 640.00 €
<b>Missões e deslocações no País</b>	2 000.00 €
<b>Consumíveis e outros</b>	600.00 €
<b>TOTAL</b>	<b>17 240.00 €</b>

## 11.5 Mestrado 4 - Ensaio laboratoriais de pequena e média escala para quantificação de parâmetros hidrogeológicos. Aplicação em ensaios em colunas de solo e no aquífero artificial do NAS

### 11.5.1 Objectivos

O objectivo desta dissertação é desenvolver um conjunto de metodologias laboratoriais para a caracterização complementar auxiliar de parâmetros hidrogeológicos e efectuar a sua aplicação prática a diferentes estudos. Pretende-se que o mestrando apreenda um conjunto de procedimentos de análise e calibração de parâmetros de quantidade e de qualidade em ensaios de laboratório, nomeadamente utilizando duas escalas: colunas em laboratório e a escala do aquífero artificial do NAS (cf. Fig. 57 e Fig. 58).



Fig. 57 - Equipamento de ensaio em coluna do NAS para determinação de parâmetros de meios porosos



Fig. 58 - Aquífero artificial do NAS para ensaios em meios porosos (4 x 2 x 1,5 m<sup>3</sup>)

Esta dissertação de mestrado insere-se no Modelo 2 de mestrados, referido na secção anterior, pelo que visa aprofundar uma metodologia de abordagem e aplicá-la a um ou mais Programas de Estudos. As metodologias e procedimentos serão aplicados a um conjunto de Programas de Estudos referidos no Quadro 27. Este trabalho vem no seguimento de um conjunto de trabalhos experimentais em laboratório que vêm sendo desenvolvidos no NAS na última década e visa não só sistematizar procedimentos através da sua aplicação a novos projectos, mas desenvolver novas metodologias de análise e quantificação de parâmetros abaixo referidas.

## 11.5.2 Linhas-mestras a desenvolver e cronograma

As linhas-mestras das actividades a desenvolver no âmbito desta dissertação são as seguintes:

- ◆ Revisão bibliográfica sobre diferentes tipos de ensaios laboratoriais passíveis de serem utilizados para a caracterização de parâmetros hidrogeológicos, quer de quantidade quer de qualidade:
  - Tipo de escalas utilizadas.
  - Infra-estruturas possíveis.
  - Características de porosos adequados.
  - Condições de saturação.
  
- ◆ Identificação e descrição de ensaios em coluna, designadamente visando a:
  - Caracterização do solo (porosidade, densidade aparente, etc.).
  - Caracterização do escoamento (caudal específico, permeabilidade, dispersão).
  - Caracterização do transporte (retardamento, retenção no solo).
  - Tipo de elementos químicos passíveis de análise.
  - Graus de saturação possíveis.
  - Hipótese de extrapolação dos parâmetros a obter para diferentes escalas de análise. Procedimentos de análise e extrapolação de resultados.
  - Definição e descrição de um conjunto de procedimentos para realização dos ensaios seleccionados.
  
- ◆ Identificação e descrição de ensaios em modelos físicos de média escala, designadamente visando a:
  - Caracterização de processos de infiltração e de recarga.
  - Caracterização do escoamento (permeabilidade, dispersão).
  - Caracterização do transporte (retardamento, retenção no solo).
  - Análise de possíveis processos de reabilitação de águas subterrâneas poluídas, designadamente utilizando técnicas de *funnel-and-gate*.
  - Tipo de elementos químicos passíveis de análise e/ou de processos de reabilitação.
  - Hipótese de extrapolação dos parâmetros a obter para diferentes escalas de análise.
  - Definição e descrição de um conjunto de procedimentos para realização dos ensaios seleccionados.
  
- ◆ Análise das potencialidades de utilização de outro tipo de infra-estruturas do DHA do LNEC para realização de outros ensaios (e.g. canal de inclinação variável para análise de problemas de intrusão marinha).
- ◆ Análise de modelos numéricos, quer para meios saturados quer para meios

parcialmente saturados, mais indicados para a calibração dos dados obtidos para:

- Escala de coluna de solo.
  - Escala de modelos físicos de média escala.
  - Seleção de modelos mais indicados e definição de procedimentos para a sua aplicação aos ensaios seleccionados e identificação de:
    - Tipo de parâmetros necessário.
    - Condições de aplicação.
    - Condições iniciais e de fronteira.
    - Resultados e sua forma de apresentação.
- ◆ Aplicação da metodologia desenvolvida a Programas de Estudos referidos no Quadro 27 (cf. pp. 290), visando:
- P1 - A análise do efeito de diferentes modelos de ocupação do solo (tipo de cultura e processos de dotação e de fertilização associados) na qualidade das águas subterrâneas através do estudo da propagação de nitratos e pesticidas em ensaios laboratoriais. Modelação numérica dos ensaios realizados.
  - P2 - O estudo da migração de águas residuais através dos solos recolhidos em áreas dos campos de golfe analisados. Análise da facilidade de lixiviação para horizontes mais profundos e análise da capacidade de retenção da poluição pelos solos envolventes. Esta tarefa terá a colaboração do mestrando a trabalhar no mestrado M1. Modelação numérica dos ensaios realizados.
  - P5 - A análise da propagação do lixiviado através de solos de áreas de antigas lixeiras. Análise da facilidade de lixiviação para horizontes mais profundos e análise da capacidade de retenção da poluição pelos solos envolventes. Modelação numérica dos ensaios realizados. Esta tarefa terá a colaboração do mestrando a trabalhar no mestrado M3.
- ◆ Redacção da dissertação.

É possível que este trabalho venha a originar mais do que uma dissertação de mestrado, caso se concretize a maioria dos Programas de Estudos e a respectiva aplicação de ensaios laboratoriais.

A tabela seguinte apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	Designação da Tarefa	Ano 1			
		Q1	Q2	Q3	Q4
1	Revisão bibliográfica sobre diferentes tipos de ensaios laboratoriais passíveis de serem utilizados para a caracterização de parâmetros hidrogeológicos	[Progress bar]			
2	Identificação e descrição de ensaios em coluna	[Progress bar]			
3	Identificação e descrição de ensaios em modelos físicos de média escala	[Progress bar]			
4	Análise das potencialidades de utilização de outro tipo de infra-estruturas do DHA do LNEC para realização de outros ensaios	[Progress bar]			
5	Análise de modelos numéricos, quer para meios saturados quer para meios parcialmente saturados, mais indicados para a calibração dos dados obtidos	[Progress bar]			
6	Aplicação da metodologia desenvolvida a Programas de Estudo	[Progress bar]			
7	Redacção da dissertação	[Progress bar]			

### 11.5.3 Custos

Os custos directamente associados à realização desta dissertação de mestrado são os seguintes:

<b>Bolsa de Mestrado</b>	14 640.00 €
<b>Missões e deslocações no País</b>	1 500.00 €
<b>Consumíveis e outros</b>	500.00 €
<b>TOTAL</b>	<b>16 640.00 €</b>

## **11.6 Doutoramento 1 - Metodologias de análise do risco em problemas de contaminação de águas subterrâneas**

### **11.6.1 Objectivos**

O objectivo desta tese é o desenvolvimento de uma metodologia de abordagem para a análise do risco em problemas de contaminação de águas subterrâneas e efectuar a sua aplicação e validação a diversas situações no âmbito dos Programas de Estudos propostos no Quadro 27 (cf. pp. 290).

O desenvolvimento deste tipo de ferramenta requer, entre outros aspectos, a identificação do tipo de análises do risco de contaminação a considerar, a definição de uma metodologia sequencial de abordagem e a definição do tipo de dados a adquirir e seu grau de detalhe. Pretende-se, ainda, que sejam definidas as formas mais adequadas de apresentação dos resultados, por exemplo sob a forma de mapas de vulnerabilidade e do risco. Este aspecto é essencial para a análise do risco poder constituir uma ferramenta eficaz no auxílio aos processos integrados de planeamento e de decisão, com uso de técnicas complementares mais avançadas, como a detecção remota e SIG.

### **11.6.2 Linhas-mestras a desenvolver e cronograma**

As linhas-mestras das actividades a desenvolver no âmbito desta tese são as seguintes:

- ◆ Revisão bibliográfica do estado da arte sobre análise do risco em questões de protecção de águas subterrâneas:
  - Conceitos e princípios.
  - Domínios de aplicação em hidrogeologia e qualidade da água.
  - Tipos de análise do risco de contaminação em águas subterrâneas (e.g. risco de afectação de sistemas de captações (protecção da saúde humana), de intrusão salina, de comprometer outros usos como massas de águas superficiais e ecossistemas associados, ou risco de poluição em termos globais).
  
- ◆ Desenvolvimento de uma metodologia de abordagem para a análise do risco em problemas de contaminação de águas subterrâneas, designadamente através da definição do tipo de:
  - Caracterização das condições existentes necessárias para uma análise do risco:
    - Definição dos objectivos e do âmbito da análise.

- Definição dos estudos geológicos, hidrogeológicos, condições climáticas, uso e ocupação do solo e de modelo conceptual necessários.
- Identificação e quantificação de pressões existentes e suas causas: origem das fontes poluentes; identificação do tipo de poluição; sua quantificação, extensão e datação; se já foi removida a origem, entre outros.
- Análise da informação histórica da zona de estudo e de casos semelhantes de onde possam ser retiradas analogias.
- Identificação dos potenciais meios receptores em risco:
  - Desenvolvimento conceptual do modelo: origem – percurso – destino.
  - Definição dos meios receptores de interesse para a análise do risco em cada uma das etapas entre a origem e o destino.
  - Identificação do tipo de risco para as diferentes etapas.
- Identificação das restrições de qualidade e legislação aplicável em função do tipo de meio receptor:
  - Caracterização das concentrações admissíveis nos meios receptores para os vários fins em uso (saúde humana, ecossistemas associados, zonas de protecção, etc.).
- Monitorização dos meios potencialmente afectados:
  - Definição de uma metodologia de monitorização para caracterização de casos de estudo atendendo ao tipo de poluentes, características intrínsecas do meio e histórico.
  - Validação da metodologia de monitorização com base em visitas de campo.
- Modelação do transporte e destino de poluentes:
  - Selecção e aplicação dos modelos em função do meio (zona vadosa ou saturada) e do tipo de poluentes (solúveis, miscíveis, voláteis, etc.).
  - Análise de cenários de evolução e comparação com as restrições legais.
- Caracterização da vulnerabilidade e quantificação do risco:
  - Análise dos factores de interesse para uma análise da vulnerabilidade e do risco utilizando uma matriz de correlação.
  - Análise dos diferentes pesos a atribuir a cada factor para a quantificação da vulnerabilidade e do risco.
  - Definição de uma metodologia de abordagem que permita combinar os diferentes factores do risco identificados e as várias ferramentas de análise utilizadas (bases de dados, SIG para sobrepor temáticas que permitam identificar pontos críticos, modelação numérica, etc.) para efectuar uma análise do risco.
- ◆ Desenvolvimento de ferramentas de apresentação dos resultados obtidos para a análise do risco:
  - Revisão bibliográfica das formas de apresentação de vulnerabilidade e risco.
  - Identificação de metodologias para a apresentação dos resultados (e.g. com a utilização de mapas).

- ◆ Análise de metodologias para o planeamento da ocupação do solo em função dos resultados da análise do risco, visando diminuir o risco de contaminação.
- ◆ Aplicação das metodologias desenvolvidas aos seguintes Programas de Estudos (cf. Quadro 27, pp. 290):
  - P1 - Avaliação da vulnerabilidade e do risco de poluição de águas subterrâneas para diferentes cenários de uso do solo.
  - P2 - Identificação dos riscos associados à utilização de águas residuais para rega de campos de golfe na qualidade das águas de jusante, *i.e.* contaminação de águas subterrâneas e de solos.
  - P3 - Análise do risco de contaminação das águas subterrâneas em aeroportos e análise da sua extensão.
  - P5 - Análise do risco de contaminação em lixeiras face ao tipo de lixiviado presente, às situações hidrogeológicas e climatéricas presentes, à idade do sistema e à vulnerabilidade do meio.
  - P7 - Desenvolvimento de metodologias para a avaliação da vulnerabilidade de sistemas aquíferos às alterações climáticas, em complemento do desenvolvido por Novo e Lobo Ferreira (2008b) para as ilhas.
- ◆ Redacção da tese.

A tabela seguinte apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	Designação da Tarefa	Ano 1				Ano 2				Ano 3				Ano 4			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Revisão bibliográfica do estado da arte sobre análise do risco em questões de protecção de águas subterrâneas	████████████████████															
2	Desenvolvimento de uma metodologia de abordagem para a análise do risco em problemas de contaminação de águas subterrâneas					████████████████████											
3	Desenvolvimento de ferramentas de apresentação dos resultados obtidos para a análise do risco					████████████████████											
4	Análise de metodologias para o planeamento da ocupação do solo em função dos resultados da análise do risco									████████████████████							
5	Aplicação das metodologias desenvolvidas a Programas de Estudo					████████████████████				████████████████████							
6	Redacção da tese					████████████████████				████████████████████							

### 11.6.3 Custos

Os custos directamente associados à realização desta tese de doutoramento são os seguintes:

<b>Bolsa de Doutoramento</b>	77 280.00 €
<b>Missões e deslocações no País</b>	3 000.00 €
<b>Relatórios e outros</b>	500.00 €
<b>TOTAL</b>	<b>80 780.00 €</b>



## **11.7 Doutoramento 2 - Medidas de mitigação e de adaptação como resposta aos impactes das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos**

### **11.7.1 Objectivos**

O actual estado de conhecimentos sobre as alterações climáticas evidencia um conjunto de mudanças do clima que terão impactes ao nível do ciclo hidrológico, designadamente alterando a sazonalidade do escoamento superficial e da recarga de aquíferos, implicando a subida do nível do mar (também devida ao aumento do volume causado pela expansão térmica da água), e causando alterações ao nível da qualidade da água, das reservas de águas subterrâneas e de fenómenos de intrusão marinha, entre diversos outros aspectos cujos efeitos se farão sentir na quantidade e na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

As alterações climáticas vêm acentuar a ocorrência de fenómenos climáticos extremos e seus efeitos na disponibilidade e na qualidade dos recursos hídricos, factos que impelem o desenvolvimento e a adopção de acções preventivas e de medidas de gestão adaptativa que permitam minimizar as suas consequências.

O objectivo desta tese é desenvolver e analisar um conjunto de respostas de mitigação e de adaptação que possam ser utilizadas para fazer face às mudanças impostas pelas alterações climáticas e aplicá-las para minimizar os seus efeitos num conjunto de situações práticas no País. Pretende-se aplicar algumas das metodologias a projectos de demonstração em escala piloto, tal como vem previsto no Programa de Estudo P8, seleccionando de entre as medidas e técnicas disponíveis, as que melhor se adequam a cada situação através do apoio de sistemas de suporte à decisão.

### **11.7.2 Linhas-mestras a desenvolver e cronograma**

As linhas-mestras das actividades a desenvolver no âmbito desta tese são as seguintes:

- ◆ Revisão bibliográfica dos principais efeitos das alterações climáticas no ciclo hidrológico: quantidade e qualidade, em complemento efectuado no Capítulo 9:
  - Análise para escalas regionais apropriadas, incluindo a identificação de fenómenos climáticos extremos.
  - Identificação de outros factores, actuais e espectáveis, que possam causar pressão nos recursos, tais como o aumento populacional, turismo, agricultura, poluição.
  
- ◆ Identificação de aspectos-chave dos efeitos das alterações climáticas nos recursos

hídricos subterrâneos de Portugal em termos de:

- Principais alterações no Estado esperadas (e.g. escoamento superficial, recarga, reservas, intrusão marinha, qualidade da água, etc.).
  - Localização geográfica geral das alterações do Estado identificadas ou potenciais.
- ◆ Análise de medidas de mitigação e de adaptação a adoptar como resposta aos impactes das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos:
- Medidas de mitigação na origem (melhoria da disponibilidade e da qualidade):
    - Redução de perdas nas redes de adução e distribuição.
    - Redução do consumo de água e promoção do seu uso eficiente.
    - Redução de pressões de origem (relacionado com as descargas poluentes e com o uso e ocupação do solo).
    - Reutilização da água (considerando que deve ter qualidade adequada aos fins que se destina).
    - Controlo da erosão e da poluição difusa e pontual.
  - Medidas de adaptação em função do problema (aumentar a disponibilidade, impedir a intrusão marinha, melhorar a qualidade da água, etc.):
    - Melhoria dos processos de recarga natural.
    - Métodos de recarga artificial de aquíferos:
      - Bacias de infiltração na zona vadosa ou outro tipo de infraestrutura como trincheiras, poços, canais, etc.
      - Furos de injeção na zona saturada.
      - Outros.
    - Metodologias para melhoria dos métodos de recarga artificial, incluindo a análise de:
      - Recarga sazonal ou interanual.
      - Uso da infiltração como processo de tratamento da água.
      - Identificação das origens de água mais adequadas para a recarga.
    - Dessalinização.
    - Revisão sobre modelos de gestão integrada de recursos hídricos que permitam otimizar o uso conjunto de águas superficiais e subterrâneas.
    - Desenvolvimento de modelos sustentáveis de captação de águas subterrâneas que atendam, designadamente a impedir a intrusão marinha em situação de alterações climáticas.
  - Análise do quadro legal de utilização do domínio hídrico a atender para as medidas de adaptação.
  - Análise da integração dos efeitos dos impactes das alterações climáticas sobre os recursos hídricos em processos de planeamento do uso da água.
- ◆ Elaboração de um DSS que permita a identificação das medidas mais adequadas a cada problema em função das características do local. Aplicação aos Programas de

Estudos P2, P3, P7 e P8:

- P2 - Identificação de potenciais medidas alternativas de gestão do uso da água, contemplando cenários com diferentes origens de água ou onde a aplicação de águas residuais seja alternada com águas de melhor qualidade, visando para atingir melhor qualidade dos solos e das águas a jusante.
  - P3 - Identificação de medidas de mitigação em áreas sujeitas a poluição rodoviária.
  - P7 - Identificação de possíveis medidas de adaptação/mitigação para as áreas que se revelem mais vulneráveis às alterações climáticas, em função das variáveis mais sensíveis e da ocupação do solo.
  - P8 - Optimização dos métodos de recarga artificial e da sua gestão que melhor conduzam à sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, tanto do ponto de vista da sua quantidade como da qualidade.
- ◆ Análise de possíveis medidas de adaptação para o conjunto de casos de estudo acima referidos (cf. Quadro 27, pp. 290), onde se efectuará designadamente:
    - Identificação das características a analisar:
      - Compilação da informação existente sobre águas subterrâneas: geologia; logs de furos com as formações atravessadas; resultados de ensaios de bombagem (permeabilidade); extracções; níveis piezométricos; qualidade da água; etc.
      - Inventariação das infra-estruturas de monitorização (meteorológicas, quantidade e qualidade das águas superficiais e subterrâneas) existentes na área e selecção de locais para a instalação de novas infra-estruturas e equipamento.
      - Utilização de dados históricos e de nova informação recolhida para caracterização global das condições dos locais.
      - Quantificação da recarga natural.
      - Caracterização da qualidade.
      - Construção de bases de dados regionais para inserção da informação em SIG sobre uso e ocupação do solo, balanços hídricos (recarga natural e artificial, extracções), características dos solos e geologia, dados hidrogeológicos de quantidade e de qualidade.
      - Caracterização da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição.
      - Desenvolvimento de um modelo integrado de águas subterrâneas, incluindo aspectos de quantidade e de qualidade. Caracterização das principais linhas de escoamento subterrâneo e da qualidade das águas subterrâneas para diferentes anos e épocas.
      - Modelação das disponibilidades hídricas, em função dos diferentes cenários climáticos e comparação dos valores obtidos com os registos históricos.
    - Identificação de possíveis respostas:

- Quantificação das necessidades de água em cada local e da sua sazonalidade.
  - Estudo de possíveis origens de água para a recarga artificial, de forma a dar resposta às necessidades de cada local de estudo.
  - Determinação do/dos método/os de recarga artificial mais adequados a implementar no local (bacias de infiltração, furos, etc.), em função da vulnerabilidade à poluição, das zonas de infiltração máxima, da necessidade de não causar intrusão marinha em zonas costeiras, da disponibilidade de terreno, etc.
  - Estudo das propriedades físicas, químicas e biológicas dos vários horizontes do solo que constituem a zona vadosa e análise da sua capacidade de infiltração e de retenção de poluentes.
- ◆ Implementação, a uma escala de demonstração, das medidas de adaptação seleccionadas como a melhor escolha (ampliando os existentes ou aplicando outros em novos locais) e monitorização da sua eficácia.
  - ◆ Redacção da tese.

A tabela seguinte apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	Designação da Tarefa	Ano 1				Ano 2				Ano 3				Ano 4			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Revisão bibliográfica dos principais efeitos das alterações climáticas no ciclo hidrológico: quantidade e qualidade	[Barra de progresso]															
2	Identificação de aspectos-chave dos efeitos das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos de Portugal	[Barra de progresso]															
3	Análise de medidas de mitigação e de adaptação a adoptar como resposta aos impactes das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos	[Barra de progresso]															
4	Elaboração de um DSS que permita a identificação das medidas mais adequadas a cada problema em função das características do local. Aplicação aos Programas de Estudo P2, P7 e P8	[Barra de progresso]															
5	Análise de possíveis medidas de adaptação para um conjunto de casos de estudo	[Barra de progresso]															
6	Implementação, a uma escala de demonstração, das medidas de adaptação seleccionadas e monitorização da sua eficácia	[Barra de progresso]															
7	Redacção da tese	[Barra de progresso]															

### 11.7.3 Custos

Os custos directamente associados à realização desta tese de doutoramento são os seguintes:

<b>Bolsa de Doutoramento</b>	77 280.00 €
<b>Missões e deslocações no País</b>	4 000.00 €
<b>Relatórios e outros</b>	700.00 €
<b>TOTAL</b>	<b>81 980.00 €</b>

## **11.8 Doutoramento 3 - Modelação numérica do impacte das pressões, ao nível da bacia hidrográfica, na qualidade das águas subterrâneas**

### **11.8.1 Objectivos**

Os objectivos desta tese de doutoramento são aprofundar os conhecimentos na área de modelação numérica do escoamento e do transporte ao nível da bacia hidrográfica. Pretende-se com este tipo de modelação analisar de forma holística os efeitos das pressões resultantes da utilização dos recursos hídricos (extracções, recarga, transferência de água, alterações climáticas, etc.) e do uso e ocupação do solo na bacia, na quantidade e na qualidade das águas subterrâneas.

Pretende-se que o bolsheiro adquira capacidades de modelação que venham a facilitar a gestão sustentável das águas subterrâneas, em especial da sua qualidade, ao nível da bacia hidrográfica ao poder incorporar um grande conjunto de informação das características da bacia e das propriedades intrínsecas do meio com as imposições do uso e ocupação do solo e a utilização dos recursos hídricos, tendo por base informação e modelação processada através de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

As aplicações práticas dos desenvolvimentos desta tese incluirão diferentes vertentes de protecção e gestão da qualidade das águas subterrâneas presentes em diversos Programas de Estudos, tal como vem referido no Quadro 27, cf. pp. 290.

### **11.8.2 Linhas-mestras a desenvolver e cronograma**

O desenvolvimento desta tese compreenderá a realização do seguinte conjunto de tarefas:

- ◆ Revisão bibliográfica de modelos para o planeamento e a gestão de recursos hídricos subterrâneos à escala da bacia hidrográfica, designadamente:
  - Ferramentas ou bases de dados para análise e previsão das propriedades hidráulicas dos diferentes meios.
  - Modelos analíticos para análise do escoamento e do transporte de massa.
  - Modelos numéricos para simulação do escoamento e transporte. Análise das suas capacidades, designadamente:
    - Tipo de modelo e das suas capacidades (escoamento, transporte, dimensões, regime de escoamento, tipos de poluentes, tipos de reacções químicas, etc.).
    - Processos físicos e químicos do escoamento e transporte de poluentes.
    - Dados de entrada e condições de fronteira.

- Processos de cálculo.
  - Interface GIS.
  - Alterações climáticas.
  - Outros
- ◆ Selecção de modelos de gestão de recursos hídricos subterrâneos ao nível da bacia hidrográfica que permitam incorporar características:
    - Gerais (em SIG) de:
      - Bacia hidrográfica (limites, topografia, rede hidrográfica, etc.).
      - Uso e ocupação do solo (tipo de vegetação, ocupação agrícola ou outra).
      - Clima (precipitação, evapotranspiração, etc.).
      - Aquíferos (limites e características geométricas gerais).
    - Hidrologia:
      - Balanço hídrico (escoamento, evapotranspiração, água do solo, recarga, etc.).
    - Zona vadosa:
      - Características dos solos (camadas, textura, porosidade, permeabilidade, grau de saturação, etc.).
      - Conceitos básicos da absorção de água e da adsorção de substâncias pelo solo/planta.
      - Modelos de transferência.
      - Transporte de poluentes (ciclo de nutrientes, etc.).
      - Outros.
    - Zona saturada:
      - Tipo de modelo (escoamento ou escoamento e transporte).
      - Dimensões (1D, 2D e 3D).
      - Regime de transporte (permanente ou variável).
      - Qualidade da água (com possibilidade de decaimento, equilíbrio químico, mais do que uma fase líquida, etc.).
      - Outros.
    - Interação águas superficiais - águas subterrâneas.
- ◆ Aplicação dos modelos numéricos mais indicados para o desenvolvimento dos Projectos de Estudo P1, P2, P5 e P6 e para apoio à análise de diferentes pressões no impacte e estado da qualidade e quantidade dos recursos hídricos e
  - ◆ Aplicação dos modelos numéricos para suporte às melhores decisões (respostas) de planeamento e gestão de recursos hídricos. Estes modelos deverão ser articulados apropriadamente com sistemas de suporte à decisão:
    - P1 - Modelação do escoamento e do transporte para diferentes cenários de ocupação agrícola do solo na bacia hidrográfica e análise dos seus efeitos a longo prazo através de modelação numérica.

- P2 - Modelação matemática do escoamento e transporte de massa, quer na zona vadosa quer na zona saturada, para projecção de cenários da evolução da qualidade da água nas massas de água potencialmente afectadas pela água de rega (residual) em golfes.
- P5 - Desenvolvimento de um modelo integrado de águas subterrâneas, incluindo aspectos de quantidade e de qualidade, em áreas envolventes a lixeiras. Caracterização dos principais processos de transporte em lixeiras e previsão da sua evolução.
- P6 - Utilização de modelos para simular o efeitos de fogos florestais na erosão e transporte para as massas de água superficial e subterrânea e sua calibração.

◆ Redacção da tese.

A tabela seguinte apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	Designação da Tarefa	Ano 1				Ano 2				Ano 3				Ano 4			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Revisão bibliográfica de modelos para o planeamento e a gestão de recursos hídricos subterrâneos à escala da bacia hidrográfica	████████████████████															
2	Seleção de modelos de gestão de recursos hídricos subterrâneos ao nível da bacia hidrográfica					████████████████											
3	Aplicação dos modelos numéricos mais indicados para o desenvolvimento dos Projectos de Estudo e para apoio à análise de diferentes pressões no impacte e estado da qualidade e quantidade dos recursos hídricos					██											
4	Aplicação dos modelos numéricos para suporte às melhores decisões (respostas) de planeamento e gestão de recursos hídricos									██							
5	Redacção da tese					██											

### 11.8.3 Custos

Os custos directamente associados à realização desta tese de doutoramento são os seguintes:

<b>Bolsa de Doutoramento</b>	77 280.00 €
<b>Missões e deslocações no País</b>	3 000.00 €
<b>Relatórios e outros</b>	500.00 €
<b>TOTAL</b>	<b>80 780.00 €</b>

## **11.9 Doutoramento 4 - Desenvolvimento e aplicação de bases de conhecimento e sistemas de suporte à decisão em estudos de qualidade de águas subterrâneas**

### **11.9.1 Objectivos**

Os objectivos deste doutoramento são desenvolver Sistemas de Suporte à Decisão (DSS) especialmente vocacionados para apoiar a solução de problemas complexos em recursos hídricos subterrâneos, *i.e.* a escolha de uma ou mais opções de entre diversas alternativas possíveis tendo em conta as principais variáveis que podem ter implicação no problema identificado.

O aumento da procura da água, a poluição e as alterações climáticas são alguns dos principais problemas que afectam o estado dos recursos hídricos subterrâneos, de forma mais ou menos directa, e que conduzem à necessidade de adopção de medidas de prevenção, mitigação e adaptação, a serem tomadas no contexto de uma abordagem integrada de gestão e de planeamento. Os DSS permitem apoiar esta abordagem na medida em que possibilitam integrar informação proveniente de diversas fontes sobre as características do local e do problema, bem como as opções para a sua resolução tendo em atenção as restrições do local e as imposições legais, contribuindo deste modo para uma análise holística e ponderada dos problemas e para um processo de tomada de decisão transparente e eficaz.

Esta tese de doutoramento visa criar uma metodologia de abordagem e aplicá-la a um ou mais Programas de Estudos referidos no Quadro 27.

### **11.9.2 Linhas-mestras a desenvolver e cronograma**

As linhas-mestras das actividades a desenvolver no âmbito desta tese são as seguintes:

- ◆ Revisão bibliográfica sobre aplicação de Sistemas de Suporte à Decisão (DSS) para apoio à decisão em recursos hídricos incluindo a análise de:
  - Base de dados e softwares para a concepção de DSS.
  - Ferramentas SIG.
  - Modelos de simulação.
  - Ferramentas de apoio à decisão (ex.: análise multicritério ou optimização multicritério).
  - Análise de sensibilidade.
  - Análises custo/benefício.
- ◆ Criação de uma metodologia para concepção de um DSS para apoio a decisões sobre recursos hídricos subterrâneos que tenha em conta, designadamente:



- Identificação e estruturação dos problemas actuais ou potenciais.
- Definição dos objectivos a atingir.
- Formulação da metodologia de abordagem.
- Definição do tipo de informação necessária, designadamente:
  - Problemas a considerar e o objecto de decisão.
  - Informação histórica da área, considerando trabalhos anteriores relevantes realizados para a mesma área.
  - Pressões existentes sobre a massa de água em estudo (ex.: escassez de água, sobreexploração, fontes de poluição pontual e/ou difusa, intrusão salina).
  - Caracterização geral dos locais de estudo com recolha de informação diversa para integração no DSS (ex.: geologia, hidrogeologia, limites de aquíferos, uso e ocupação do solo, rede hidrográfica, captações).
  - Inventariação das infra-estruturas existentes que possam ser utilizadas para monitorização futura.
  - Definição de um plano de monitorização, incluindo a selecção de locais para a instalação de novas infra-estruturas.
- Construção de uma base de dados georeferenciada que permita o correcto armazenamento, gestão e transferência da informação hidrogeológica e inventariação de outros tipos de informação com interesse.
- ◆ Definição de uma metodologia para a avaliação das opções (soluções) para o(s) problema(s) identificado(s) utilizando, designadamente:
  - Desenvolvimento de soluções alternativas para o problema e avaliação da viabilidade de cada uma delas.
  - Utilização de modelos adequados às situações em estudo que incorporem a informação das bases de dados desenvolvidas e de ferramentas SIG.
  - Informação das restrições legais e condicionalismos físicos e socioeconómicos.
  - Realização de análises de sensibilidade e/ou análises de incerteza:
    - Análise custo/benefício.
    - Análise causa/efeito.
    - Análise multicritério.
    - Optimização multicritério.
  - Selecção de uma ou mais opções:
    - Identificação de soluções e alternativas.
    - Validação dos resultados obtidos através dos modelos utilizados.
    - Justificação da solução seleccionada.
  - Implementação da opção seleccionada:
    - Recomendações.
    - Comunicação eficaz aos decisores.
- ◆ Aplicação da metodologia DSS desenvolvida a Programas de Estudos referidos no Quadro 27 (cf. pp. 290), visando:

- P1 - Apoiar a melhor decisão em termos do uso e ocupação agrícola do solo, atendendo às características intrínsecas das bacias e às restrições legais em termos de qualidade da água de jusante.
- P2 - Analisar as melhores alternativas de irrigação de campos de golfe (água de escorrência armazenada em bacias de retenção ou detenção no local; água residual tratada; água de abastecimento público; massas de água superficial existentes; e águas subterrâneas) atendendo às características intrínsecas dos locais, à disponibilidade dos vários tipos de água e às restrições legais em termos de qualidade da água de jusante.
- P4 - Apoiar a definição e identificação de massas de água sensíveis à poluição rodoviária, para as quais devem ser tomadas medidas de protecção adequadas.
- P5 - Apoiar a avaliação dos factores mais relevantes na escolha de medidas que permitam minimizar a erosão, regular o ciclo hidrológico e proteger a qualidade das águas em áreas ardidas, bem como as áreas onde devem ser aplicadas.
- P8 - Apoiar a determinação do(s) método(s) de recarga artificial mais adequado(s) a implementar em diferentes locais (bacias de infiltração, furos, etc.), em função da vulnerabilidade à poluição, das zonas de infiltração máxima, da necessidade de não causar intrusão marinha em zonas costeiras, da disponibilidade de terreno, disponibilidade de água, etc.

◆ Redacção da tese.

A tabela seguinte apresenta um cronograma com a previsão do desenvolvimento das tarefas propostas.

ID	Designação da Tarefa	Ano 1				Ano 2				Ano 3				Ano 4			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Revisão bibliográfica sobre aplicação de Sistemas de Suporte à Decisão (DSS) para apoio à decisão em recursos hídricos	██████████															
2	Criação de uma metodologia para concepção de um DSS para apoio a decisões sobre recursos hídricos subterrâneos					████████████████████											
3	Definição de uma metodologia para a avaliação das opções (soluções) para o(s) problema(s) identificado(s)									████████████████████							
4	Aplicação da metodologia desenvolvida para DSS a Programas de Estudo									████████████████████							
5	Redacção da tese					████████████████████											

### 11.9.3 Custos

Os custos directamente associados à realização desta tese de doutoramento são os seguintes:

<b>Bolsa de Doutoramento</b>	77 280.00 €
<b>Missões e deslocações no País</b>	3 000.00 €
<b>Relatórios e outros</b>	500.00 €
<b>TOTAL</b>	<b>80 780.00 €</b>



## **12 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

---

### **12.1 Síntese dos objectivos e dos programas**

Este Programa de Habilitação intitula-se **Gestão integrada e sustentável da qualidade das águas subterrâneas em Portugal: contributos para um Bom estado em 2015**. Os seus objectivos são propor um conjunto de linhas de investigação e de desenvolvimento que contribua para proteger, melhorar e reabilitar a qualidade das massas de águas subterrâneas das principais origens de contaminação e de deterioração a que estão, ou possam vir a estar, sujeitas. As principais linhas de força dos Programas de Estudos e de Pós-graduação visam contribuir com respostas que permitam assegurar a redução global da poluição e/ou a manutenção da qualidade das águas, tendo em vista alcançar um Bom estado das águas subterrâneas (químico e quantitativo) em 2015.

O trabalho foi estruturado em duas partes: Parte A - Programa de Investigação e Parte B – Programa de Pós-graduação.

O Programa de Investigação inclui uma síntese dos conhecimentos existentes sobre o tema abordado, uma apresentação crítica dos problemas já tratados e dos problemas em aberto, bem como um Programa de Estudos relativo a oito temáticas, explicitando-se o enquadramento e justificação, os objectivos, a metodologia proposta - linhas-mestras a desenvolver, o planeamento dos meios necessários, incluindo meios humanos e financeiros, e os benefícios esperados com cada programa.

Actividades potencialmente poluidoras (5 programas):

Projecto n.º 1 – **SUSTBASIN**: Sustainable rural land use planning and management at basin scale: towards groundwater protection from **diffuse pollution**

Projecto n.º 2 – **AMBIGOLFE**: Sustentabilidade ambiental do uso de águas residuais para rega de campos de **golfe**

Projecto n.º 3 – **AVAL AERO**: Avaliação da poluição de águas subterrâneas e de solos em áreas envolventes de **aeroportos**

Projecto n.º 4 – **ID ROADS**: Identification and protection of water bodies sensitive to pollution from **roads**

Projecto n.º 5 – **MILQAS**: Minimização do impacte de **lixeiros** na qualidade das águas subterrâneas

Pressões causadas por catástrofes 'naturais' (1 programa):

Projecto n.º 6 – **MANAGE\_FF2**: Minimização do efeito de catástrofes naturais na qualidade das águas subterrâneas: **fogos florestais**

Mudanças impostas pelas alterações climáticas (2 programas):

Projecto n.º 7 – **MAIA**: Metodologias de avaliação dos impactes das **alterações climáticas** na vulnerabilidade dos aquíferos à poluição e na qualidade das águas subterrâneas

Projecto n.º 8 – **IMAGINATION**: Integrated management of surface and groundwater as a strategic response to **climate change** impacts adaptation in a long-term perspective

O Programa de Pós-graduação é apresentado na Parte B deste documento. Nele se explicita e delinea as oportunidades de formação decorrentes da execução do programa de investigação e se indica formas de as concretizar, através da apresentação do enquadramento científico, das linhas-mestras e dos meios humanos e materiais para realização de quatro dissertações de mestrado e de quatro teses de doutoramento a desenvolver no âmbito dos projectos.

## 12.2 Benefícios a alcançar

Os benefícios a alcançar com o conjunto de **Programas de Estudos** referidos no Capítulo 10 é aqui brevemente referido, através da transcrição das secções finais de cada programa.

Projecto n.º 1 – **SUSTBASIN**: Sustainable rural land use planning and management at basin scale: towards groundwater protection from **diffuse pollution**

This project has a clear importance in what concerns the integrated watershed land use planning aiming a sustainable use of soil capable of protecting downgradient water resources.

The results expected with this project can be divided in two main aspects:

- ◆ Suggestions for better land use management: determination of more suitable land use crops and fertilizers application for a future better protection of the groundwater quality from diffuse pollution;
- ◆ Improvement of socio-economic conditions: application of an environmentally more sustainable agriculture, namely by contributing to avoid the declaration of other vulnerable zones (Directive n. 91/676/CE that poses several constrains to agriculture practices).

The scientific activity to be developed foresees a clear engagement with the authorities responsible for the land use in the case study area in order to connect the farmers, land use planners, landowners and the local authorities in the project purpose. Their advices and opinions will guide the scenarios to be investigated in order that in the end the results can be useful for their future decisions in terms of fertilizers applications and crop to be selected, aiming the awareness and protection of groundwater quality.

Projecto n.º 2 – **AMBIGOLFE**: Sustentabilidade ambiental do uso de águas residuais para rega de campos de **golfe**

Com este programa pretende-se contribuir para melhorar a sustentabilidade da utilização dos recursos hídricos, através da utilização de recursos não convencionais para a irrigação de campos de golfe, desde que a oferta de águas residuais sirva a procura pelos campos de golfe e desde que sejam respeitados os requisitos de protecção reflectidos no princípio da precaucionaridade.

O benefício esperado com este programa é permitir analisar a sustentabilidade ambiental da utilização de águas residuais para a rega de campos de golfe, *i.e.* sem que tal constitua um perigo para a qualidade dos solos e das águas subterrâneas da área. Pretende-se, assim, criar algum do conhecimento necessário para decidir o alargamento deste procedimento a outros campos de golfe ou, pelo contrário, alertar para eventuais problemas de contaminação que possam surgir a médio ou a longo prazo, sugerindo-se alternativas de sistemas de rega.

Projecto n.º 3 – **AVAL AERO:** Avaliação da poluição de águas subterrâneas e de solos em áreas envolventes de aeroportos

Os benefícios esperados com este programa relacionam-se com o incremento dos conhecimentos no domínio da contaminação em zonas aeroportuárias, ao nível do tipo de contaminantes encontrados, suas principais formas de dispersão no meio ambiente envolvente (solos e águas), limites das áreas envolventes atingidas, de forma a permitir definir o tipo de infra-estruturas e meios mais adequados à minimização deste tipo de contaminação e à reabilitação de áreas já contaminadas.

Projecto n.º 4 – **ID ROADS:** Identification and protection of water bodies sensitive to pollution from roads

Transport infrastructures cross many different natural environments (e.g. geology, different climatic conditions, etc.) and connect many urban centres with different historical development and planning practices. During last years EU countries have constructed large transport infrastructures and a lot of effort was placed in proper environmental protection measures and procedures. However, still many relevant questions remain. For example, during the cooperation in the project COST 351 "Water movement in pavement and embankment" it was realised that existing procedures for defining sensitive water bodies are deficient and imprecise.

Results of this project will facilitate the fulfilment of the demands of the Water Framework Directive in connection with the planning, design, construction, maintenance and operation of roads. The methodology will allow defining sensitive water bodies to road pollution, as well as protection measures to avoid water quality degradation, and therefore will contribute to consistent procedures that will have clear positive impact in sustaining water bodies quality. Results of work will target environmental scientist, planners, designers, engineers responsible for infrastructure maintenance and operation, environmental and infrastructure authorities, people responsible for monitoring, decision makers and infrastructure regulators.

Projecto n.º 5 – **MILQAS:** Minimização do impacte de lixeiras na qualidade das águas subterrâneas

Um programa desta natureza permitirá quantificar o grau e a extensão de um problema de contaminação difusa no território nacional, cujos efeitos apenas se conhecem em casos isolados e propor metodologias adequadas à sua contenção, minimização e reabilitação. A grande quantidade deste tipo de infra-estruturas no País sem que haja uma acção concreta de análise da situação poderá comprometer o objectivo principal da Directiva das Águas Subterrâneas, de proteger as águas subterrâneas contra a contaminação e a deterioração.

Neste programa propõe-se caracterizar um número de situações que possam ser

representativas das condições de deposição, climáticas e hidrogeológicas de forma a estimar o grau e a extensão deste tipo de contaminação.

Projecto n.º 6 – **MANAGE\_FF2: Minimização do efeito de catástrofes naturais na qualidade das águas subterrâneas: fogos florestais**

Os fogos florestais são uma realidade que afecta cada vez mais os países mediterrânicos durante o período de Verão. Em Portugal, a série de incêndios que tem vindo a assolar as florestas nacionais nas últimas décadas, tem como consequência a sua alteração em termos de estrutura e configuração, representando ainda uma grave ameaça à qualidade das águas e do solo, designadamente através dos efeitos da erosão. Contudo, os efeitos do fogo florestal sobre estes sistemas e a sua modelação não são ainda claramente dominados pela comunidade científica.

Com este programa pretende-se ganhar conhecimento sobre o efeito do regime de fogos e da ocupação do solo no País na afectação dos recursos água e solo, nomeadamente através de modelação numérica ao nível da bacia hidrográfica, bem como da definição de medidas e acções a tomar de forma a procurar minimizar os efeitos dos fogos florestais na qualidade e quantidade dos solos e das águas subterrâneas, com auxílio de um DSS. Pretende-se incorporar não só o novo conhecimento a adquirir com este Programa, mas também inserir os conhecimentos obtidos em trabalhos anteriores desenvolvidos por diferentes equipas de trabalho no País procurando uma análise da extrapolabilidade dos impactes negativos dos fogos florestais a outras bacias hidrográficas.

Espera-se também compreender os mecanismos de transferência de elementos químicos que ocorrem entre os meios citados e relacionar a presença destes elementos com as características da área, como por exemplo o tipo de solo e a vegetação.

Projecto n.º 7 – **MAIA: Metodologias de avaliação dos impactes das alterações climáticas na vulnerabilidade dos aquíferos à poluição e na qualidade das águas subterrâneas**

Os benefícios directos esperados com este programa são dois: (1) estabelecer uma metodologia de análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas às alterações climáticas e (2) avaliar o efeito que anteriores anos secos e húmidos tiveram na qualidade das águas subterrâneas procurando identificar as principais variáveis que estiveram na sua origem e a sua relação com alterações climáticas.

Este programa permitirá estabelecer metodologias de análise dos efeitos das alterações climáticas na disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos, pelo que poderá servir de suporte ao desenvolvimento de acções que visem a gestão sustentável e integrada dos

recursos hídricos, nomeadamente através da adopção de medidas de adaptação (como p.e. a recarga artificial proposta num programa na Secção 10.11) apropriadamente aplicadas a áreas mais carenciadas em função das características de vulnerabilidade as alterações climáticas que apresentam.

Projecto n.º 8 – **IMAGINATION: Integrated management of surface and groundwater as a strategic response to climate change impacts adaptation** in a long-term perspective

O benefício de um programa de demonstração desta natureza é contribuir para o estabelecimento de metodologias de gestão conjunta dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais, adequadas não só às actuais condições climatológicas e de escoamento/recarga, mas também que enquadrem as alterações esperadas para o ciclo hidrológico como resultado de alterações climáticas.

Serão estudadas situações muito diversas, e em vários países, onde se analisa o uso conjunto de águas subterrâneas e superficiais através do seu armazenamento em situações de excedente hídricos (cheias, água de estações de tratamento, etc.) para poder vir a utilizá-los em épocas de escassez. Particular ênfase será dada ao uso de métodos de recarga artificial. Pretende-se que o conjunto de informação e de dados permitam estabelecer uma metodologia global para a selecção de estratégias eficazes para a adaptação e minimização dos efeitos das alterações climáticas na quantidade e qualidade dos recursos disponíveis, atendendo às características específicas de cada local.

Para o **Programa de Pós-graduação** propõe-se a realização de quatro dissertações de mestrado e de quatro teses de doutoramento para um período de oito anos. Os benefícios a alcançar com estes trabalhos de pós-graduação são o apoio à realização dos Programas de Estudos referidos no Capítulo 10, consubstanciado através do desenvolvimento e da aplicação de um conjunto de metodologias e de ferramentas que serão aplicadas aos Programas. As áreas de pós-graduação seleccionadas cobrem a modelação física e numérica, bem como um conjunto de metodologias de análise que incluem o desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão, de análise do risco e de metodologias de mitigação e de adaptação, entre outros temas.

As dissertações de mestrado correspondem à elaboração de trabalhos em que se visa: (**Modelo 1**) aplicar um conjunto de metodologias e de ferramentas desenvolvidas no NAS para a análise e desenvolvimento de um dos Programas de Estudos (cf. Capítulo 10); ou (**Modelo 2**) aprofundar uma metodologia de abordagem e aplicá-la a um ou mais Programas de Estudos (cf. Capítulo 10). As teses de doutoramento correspondem à criação de metodologias e de ferramentas inovadoras a nível internacional em áreas onde o NAS necessita de investimento a curto prazo e sua aplicação prática e validação a diversos Programas de Estudos propostos no Capítulo 10.



## 12.3 Exequibilidade

### 12.3.1 Recursos humanos

Além do conjunto de quatro bolsheiros de mestrado e quatro de doutoramento previstos para a realização dos Programas de Estudos e de Pós-graduação propostos, o Núcleo de Águas Subterrâneas conta com o seguinte conjunto de elementos da carreira de investigação e da carreira técnica superior: João Paulo de Cárcamo Lobo Ferreira (Investigador-Coordenador e Chefe do Núcleo), Manuel Mendes de Oliveira (Investigador Auxiliar), Maria Emília Novo (Investigadora Auxiliar), Maria José Henriques (Técnica Superior), além da autora que é Investigadora Principal.

A acrescentar a este conjunto de elementos, o Núcleo tem sempre contado com o apoio de diferentes colaboradores que participam, em média dois por ano, nas actividades do sector no âmbito de projectos em curso, por vezes associados ao desenvolvimento dos seus mestrados ou doutoramentos. Boa parte desses colaboradores eram estrangeiros e obtiveram bolsas *TechWare - Human Capital and Mobility* e os restantes receberam bolsas nacionais da Fundação para a Ciência e a Tecnologia ou equivalentes. É previsível que as novas estruturas de cursos adaptadas ao processo de Bolonha, *i.e.* com o 2.º Ciclo de Bolonha que tem o mestrado integrado, traga a possibilidade ao LNEC de poder vir a contar com a colaboração de mestrandos nas áreas dos seus projectos, mesmo quando não acompanhados de bolsas de mestrado. Esta possibilidade traz um claro benefício mútuo. Os alunos beneficiam da integração das suas dissertações em projectos em curso que dispõem de recursos financeiros para a sua execução e que têm objectivos e benefícios esperados claramente definidos e o LNEC pode contar com a colaboração de pessoas interessadas em desenvolver aprofundadamente as matérias e que estão condicionadas a prazos bem definidos.

O total de recursos humanos previsto para o conjunto dos projectos é de 85 meses de investigador e 45 meses de pessoal da carreira técnica superior. Atendendo a que o sector tem quatro/cinco investigadores e que o horizonte previsto para a elaboração dos programas propostos é de oito anos (até 2016), o investimento em pessoa\*mês para esse período é equivalente a 0,18 [85 meses/(8 x 12 meses) /5 pessoas]. Em relação ao pessoal da carreira técnica superior, o investimento corresponde a cerca de 0,47 pessoa\*mês [45 meses/(8 x 12 meses)/1 pessoa], *i.e.* cerca de metade do tempo disponível da técnica superior do NAS.

### 12.3.2 Recursos financeiros

O total das verbas solicitadas para o financiamento dos programas propostos, para a componente a ser realizada pelo sector, é de 2 057 230 €. Este montante inclui os valores das bolsas para os mestrandos e doutorandos a integrar nos projectos, embora não considere os

montantes relativos ao desenvolvimento das componentes dos parceiros de projectos, mesmo quando pertencentes a outros departamentos do LNEC.

O financiamento global a obter provirá das seguintes fontes: 7.º Programa-Quadro com 975 705 €; FCT/Interreg IV com 484 090 € (incluindo bolsas) e PIP/LNEC com 597 435 €, valor correspondente à comparticipação obrigatória de 25% dos projectos Europeus e aos custos de pessoal do LNEC para os projectos financiados pela FCT (uma vez que para estes projectos não são elegíveis custos de pessoal).

Procurar-se-á que o financiamento previsto para o PIP/LNEC possa vir a ser em boa parte a ser obtido junto das entidades interessadas nos estudos propostos, mencionadas na última coluna do Quadro 26 como entidades financiadoras. Presentemente foi já concedido um montante de cerca de 100 000 € por uma das entidades financiadoras referidas, cobrindo parcialmente os custos de um projecto onde se pretende integrar os resultados a obter.

## 12.4 Epílogo

O antigo provérbio do Quénia com que se começa este Programa condensa a ideia subjacente aos seus objectivos, ao pretender-se contribuir para uma *gestão integrada e sustentável da qualidade das águas subterrâneas em Portugal: contributos para um Bom estado em 2015*: "se queres ir rápido, vai sozinho; se queres ir longe, junta-te a outros"!

Efectivamente, a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos - que será objecto de análise nos Planos de Gestão de Bacia Hidrográfica a realizar pelos Estados-membros até final de 2009 - é um processo complexo, na medida em que implica que se conjuguem requisitos legais com exequibilidade técnica, conhecimento científico e aspectos socioeconómicos, o que exige a consulta e a interligação entre múltiplos actores que actuam num mesmo domínio físico (políticos, administração central e local, investigadores, actores (*stake-holders*), indústria, agricultura, ONG's, entre outros).

Este modelo exige uma transparente e solidária articulação das políticas públicas e uma clara definição das competências e coordenação de iniciativas dos vários responsáveis pela administração do território, onde se reconheçam as dimensões de natureza ambiental, ética, social e económica.

A função dos investigadores é dar a conhecer o funcionamento do sistema de forma a permitir aos decisores e gestores tomarem as decisões de forma científica e tecnicamente fundamentada. Procurou-se que este programa fosse ao encontro dos aspectos fundamentais da poluição de águas subterrâneas, em termos das principais forças motrizes e pressões a que estão sujeitos, e da análise das principais lacunas de conhecimento que impedem a tomada de respostas adequadas. Através do Programa de Estudos e de Pós-graduação apresenta-se um exercício prospectivo no sentido elencar as principais linhas de actuação que, em nosso

entender, devem ser porfiadas para obter a informação necessária para agir, para dar resposta. Nesse contexto, o conceito DPSIR [*D* *riving Force* (Força Motriz) - *P* *ressure* (Pressão) - *S* *tate* (Estado) - *I* *mpact* (Impacte) - *R* *esponse* (Resposta), cf. Fig. 8] foi seleccionado para os programas, no sentido que se pretendeu que o ciclo de análise fosse fechado com respostas e não apenas com diagnósticos.

Os problemas ambientais estão a tornar-se cada vez mais complexos, exigindo, para a sua resolução, conhecimentos cada vez mais específicos, bem como a eficiente integração de diversos esforços entre diferentes áreas de conhecimento. Urge acelerar o reforço da colaboração e coordenação entre instituições, os seus programas e projectos de investigação e desenvolvimento, permitindo que alcancem os vários níveis de decisão, promovendo adequadas formas de governança.

*"Há muitas disciplinas, mas o Mundo é um só"* (Torsten Hägerstrand, in Hilding-Rydevik and Johansson, 1997).

Teresa E. Leitão  
31 de Outubro de 2008



## BIBLIOGRAFIA

ADAR E.M., DODY A., GEYH M.A., YAIR A., YAKIREVICH A., ISSAR A. S., 1998 - *Distribution of stable isotopes in arid storms. I. Relation between the distribution of isotopic composition in rainfall and in the consequent runoff*. Hydrogeology Journal (1998) 6:50-65.

AEIO, 2003 - *Gestión de los recursos hídricos mediante la hidrología isotópica*". Colección de Información del Organismo Internacional de Energia Atómica. División de Información Pública. 02-01581/FS Series 2/03/S.

ALLEY, W.M., REILLY T.E. e FRANKE. O.L., 1999 - *Sustainability of Groundwater Resources*. U.S. Geological Survey Circular 1186, 86 pp.

ALLOWAY, B.J., 1993a - *Risk Assessment of Contaminated Land*. Proceedings do European Short Training Course "Soil & Groundwater Cleaning", Estoril, pp. 88-104.

ALLOWAY, B.J., 1993b - *The Behaviour of Inorganic and Organic Pollutants in Soils*. Proceedings do European Short Training Course "Soil & Groundwater Cleaning", Estoril, pp. 34-43.

ALMEIDA, C., MENDONÇA, J.J.L., JESUS, M.R. e GOMES, A.J., 2000 - *Actualização do Inventário dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*, Centro de Geologia e Instituto da Água.

APPELO, C.A.J. e POSTMA, D., 1993 - *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Holanda, A.A. Balkema Publishers, 1993, 536 pp.

ATTEWELL, P., 1993 - *Ground Pollution: Environment, Geology, Engineering and Law*. Londres, E & Fn Spon e Chapman & Hall, 1993, 251 pp.

AYERS, R. S. e WESTCOT, D.W., 1987 - *Water Quality for Agriculture: FAO - Irrigation and Drainage Paper 29*, rev. 1. FAO, 174 pp.

BARBOSA, A. E. e FERNANDES, J., 2008 - *Avaliação da Eficácia das Medidas de Minimização de Impactes Ambientais Implementadas em Portugal. Sistemas de Tratamento de Águas de Escorrência. Relatório Final*. Relatório 187/08 - NRE, LNEC, 89 pp.

BARBOSA, A. E. e HVITVED-JACOBSEN, T., 2000 - *Projectar Bacias de Infiltração para a Gestão de Águas Pluviais*. 5.º Congresso da Água, 25-29 de Setembro, Lisboa, APRH, 15 pp.; in Recursos Hídricos, 21 (3), pp.125-132.

BARBOSA, A. E. e HVITVED-JACOBSEN, T., 2001 - *Infiltration Pond Design for Highway Runoff Treatment in Semiarid Climates*. J. Environmental Eng., ASCE, 127 (11) 1014-1022.

BARBOSA, A.E. e HVITVED-JACOBSEN, T., 1999 - *Highway runoff and potential for removal of heavy metals in an infiltration pond in Portugal*. Science of the Total Environment 235: 151-159.

BARBOSA, A.E., 1999 - *Highway Runoff Pollution and Design of Infiltration Ponds for Pollutant Retention in Semi-arid Climates*. Ph.D. Dissertation Series. The Environmental Engineering Laboratory, Aalborg University, Denmark.

BARBOSA, A.E., 2003 - *Modelos para a Previsão da Qualidade das Águas de Escorrência de Estradas em Portugal*, pp. 93-107, in "Curso Sobre Características de Águas de Escorrência de Estradas em Portugal e Minimização dos seus Impactes", Barbosa, A.E., Leitão, T.L., Hvitved-Jacobsen, T. e Bank, F. (eds.), Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 176 pp.

BATES, B.C., KUNDZEWICZ, Z., WU, S., e PALUTIKOF, J., 2008 - *Climate Change and Water*. Grupo de Trabalho II do Intergovernmental Panel on Climate Change, Secretariado do IPCC, Geneva, 210 pp.

BATISTA, S., 2003 - *Exposição da Água Subterrânea a Pesticidas e Nitratos em Ecosistemas Agrícolas do Ribatejo e Oeste e da Beira Litoral*. Tese de Doutoramento, ISA, UTL, 464 pp.

BEAR, J. e VERRUIJT, A., 1987 - *Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Holanda, D. Reidel Publishing Company, 414 pp.

BEAR, J., 1972 - *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Nova Iorque, Elsevier, 1972.

BERNADAC, A., FOURNIER-MELIN, E. e GALINDOU, M.L., 2004 - *Guide Technique: Eau et Aéroport. Mise en Conformité au Titre de la Loi sur L'eau*. Service Technique des Bases Aériennes, 46 pp.

BERNARDO, S., 1995 - *Manual de Irrigação*. 6.<sup>a</sup> edição. Viçosa: Editora da UFV. 657pp.

BETTS, K.S., 1999 - *Airport Pollution Prevention Takes Off*. Environmental Science and Technology, Vol. 33, Issue 9, pp. 210A – 212 A.

BIDLEMAN, T.F., 1999 - *Atmospheric Transport and Air-Surface Exchange of Pesticides*. Water, air and soil pollution, v. 115, n. 2. p.115-166.

BITNER, K., GALLAHER, B., MULLEN, K., 2001 - *Review of Wildfire Effects on Chemical Water Quality*. Los Alamos National Laboratory, New Mexico, Estados Unidos da América.

BLOMQUIST, G. 1998. *Impact of De-Icing Salt on Roadside Vegetation - A Literature Review*. VTI relatório 427 A. Linköping.

BOULDING, J.R., 1995 - *Practical Handbook of Soil, Vadose Zone, and Ground-Water Contamination. Assessment, Prevention, and Remediation*. Florida, Lewis Publishers, Inc., 1995, 948 pp.

BRENČIČ, M., DAWSON, A., FRANCOIS, D., FOLKESON, L., LEITÃO, T., 2008 - *Strategies for Mitigating Road Pollution of Water Bodies*. Comunicação apresentada à Conferência do Transport Research Arena intitulada "Greener, Safer and Smarter Road Transport for Europe", Ljubljana, Slovenia, 21 a 24 de Abril de 2008, 5 pp.

BRUMMER, G.W., 1986 - *The Importance of Chemical Specification in Environmental Processes*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 169-192.

BRUNO, J., 1997 - *Trace Element Modelling*, Chapter XIV - Modelling in Aquatic Chemistry. Publicações ECDE, 724 pp., ISBN 92-64-15569-4.

BURTON Jr., G.A. e PITT, R. E., 2002 - *Stormwater Effects Handbook*. Lewis Publishers, Inc., 911 pp.

CAMPO G., ORSI M., BADINO G., GIACOMELI R. e SPEZZANO P., 1996 - *Evaluation of Motorway Pollution in a Mountain Ecosystem. Pilot project: Susa Valley (Northwest Italy) years 1990-1994*. The Science of the Total Environment 189/190: 161-166.

CANTER, L.W., KNOX, R.C. e FAIRCHILD, D.M., 1987 - *Ground Water Quality Protection*. Michigan, Lewis Publishers, Inc., 1987, 562 pp.

CEREJEIRA, M., SILVA, E., BATISTA, S., TRANCOSO, A., CENTENO, M. e SILVA FERNANDES, A., 2000 - *Simazine, metribuzine and nitrates in groundwater of agriculture areas of Portugal*. Toxicol. Environ. Chem., 75: 245-253.

CEREJEIRA, M., VIANA, P., BATISTA, S., PEREIRA, T., SILVA, E., VALÉRIO, M., SILVA, A., E SILVA FERNANDES, A., 2003 - *Pesticides in Portuguese surface and groundwaters*. Water Res., 37: 1055-1063.

CHAPMAN, D., 1996 - *Water Quality Assessment – A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. Second Edition, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, World Health Organization, UNESCO/WHO/UNEP, ISBN 0419 21590 5 (HB).

CHEN ZONGYU C., NIE Z. e ZHANG G., 2006 - *Environmental isotopic study on the recharge and residence time of groundwater in the Heihe River Basin, northwestern China*. Hydrogeology Journal (2006) 14: 1635 -1651.

CUNHA, L.V., OLIVEIRA, R.P. e NUNES, V.B., 2002 - *Impactos das Alterações Climáticas sobre os Recursos Hídricos de Portugal*. Apresentação efectuada ao "III Congresso Ibérico sobre Gestión y Planificación de Aguas: La Directiva Marco del agua: realidades y futuros". Sevilha 13-17 de Novembro de 2002, 13 pp.

CUNHA, L.V., OLIVEIRA, R.P., RIBEIRO, L. e NASCIMENTO, J., 2004 - *Impactos das Alterações Climáticas nos Recursos Hídricos Portugueses*. Comunicação apresentada no Instituto do Ambiente, 14 de Julho de 2004.

CUNHA, L.V., RIBEIRO, L., OLIVEIRA, R.P. e NASCIMENTO, J., 2006 - *Recursos Hídricos*, in "Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação". Projecto SIAM II, eds. F.D. SANTOS e P.MIRANDA, pp. 115-168.

CUSTODIO, E. e LLAMAS, M.R., 1976 - *Hidrología Subterránea*. 1ª Edição, Barcelona, Ediciones Omega, S.A., 1976, 1157 pp.

DAPEÑA C. e PANARELLO H.O., 2004 - *Composición isotópica de la lluvia de Buenos Aires. Su Importancia para el estudio de los sistemas hidrológicos pampeanos*. Revista Latino-Americana de Hidrogeología, n.º 4, pp. 17-25.

DAWSON, A., 2008 - *Water in Road Structures: Movement, Drainage & Effects*. Nottingham Transportation Engineering Centre, University of Nottingham, UK (Ed.). ISBN: 978-1-4020-8561-1. Springer.

DEFRA, 2004 – *Mapping the Problem. Risk of Diffuse Water Pollution from Agriculture*. Department for Environment, Food and Rural Affairs, 39 pp. < [http://www.npa-uk.net/ds\\_portal/library/mapping-problem-lowres.pdf](http://www.npa-uk.net/ds_portal/library/mapping-problem-lowres.pdf) > (June 2004).

DELGADO RODRIGUES, J., LOBO FERREIRA, J.P., SANTOS, J.B. e MIGUÉNS, N., 1989 - *Caracterização Sumária dos Recursos Hídricos Subterrâneos de Portugal Continental*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória n.º 735, 1989, 31 pp.

DELRIEU, D. e MARS, B., 2007 - *Problématique de la pollution des sols aéroportuaires. Note technique sur la problématique de la pollution des sols aéroportuaires*. Direction Générale de l'Aviation Civile. Service Technique de l'Aviation Civile. Note sol-aéroportuaires-V1R0-23032007. Toulouse, 44 pp.

DIAMANTINO, C., 2002 - *Poluição Causada pelo Tráfego Rodoviário nos Solos e nas Águas Subterrâneas. Um caso de estudo na EN10 – Recta do Cabo*. Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para obtenção do Grau de Mestre em Geologia Económica e Aplicada. Setembro de 2002, 226 pp.

DIAMANTINO, C., LOBO FERREIRA, J.P. e MOTA, R., 2008 - *Ensaio de Recarga Artificial e Aplicação de Métodos Geofísicos no Leito do Rio Seco (Projecto Gabardine)*. 9.º Congresso da Água. 2 a 4 de Abril de 2008, Cascais, 15 pp.

DIAMANTINO, C., LOBO FERREIRA, J.P. e NOVO, M.E., 2005 - *Policies for the application of pollutant transport models in groundwater (Decision making methodology for the application of pollutant transport models)*. WP9 Final Report on Reasoning about models selection. MANPORIVERS Project Deliverable 35. Relatório /05 - NAS, LNEC, 63 pp.

DIRECTIVA 2000/60/EC, 2000 - *Directiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2000 que estabelece um quadro de acção comunitária no domínio da política da água*. Jornal Oficial da Comunidade Europeia L 327, 22.12.2000.

DMRB, 2006 - *Design Manual for Roads and Bridges: Volume 11, Section 3, Part 10. HA 216/06, Road Drainage and the Water Environment*. 19 pp.

DORES, E.F.G.C. e DE-LAMONICA-FREIRE, E.M., 2001 - *Contaminação do Ambiente Aquático por Pesticidas – Estudo de Caso: Águas Usadas para Consumo Humano em Primavera do Leste, Mato Grosso - Análise Preliminar*. Química Nova, v. 24, n. 1. pp. 27-36.

DWORAK, T., KARACZUN, Z., HERBKE, N., SCHLEGEL, S. e LANDGREBE - TRINKUNAIT, R., 2005 - *Water Framework Directive meets Common Agricultural Policy - Opportunities for the* <http://www.ecologic.de/modules.php?name=News&file=article&sid=1369>

DWW, 1995 - *Microcontamination along Highway: an Evaluation*. DWW 95-735 report, Ministry of Transport, Delft, 1995, 40 pp.

EEA, 2005 - *Sustainable Use and Management of Natural Resources*. European



Environment Agency, ISBN 92-9167-770-1, 68 pp.

EPA, 1978 - *Process Design Manual Municipal Sludge Landfills*. U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, EPA, Cincinnati, OH.

EUFIRELAB, 2006 - *Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a "Wall-less" Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region. Deliverable D-04-12 - Wildland Fires Impacts: a State of the Art; final version*.

EUFIRELAB, 2006a - *Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a "Wall-less" Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region. Deliverable D-01-16\_Scientific*. Final Scientific Report.

FAO, 1979 - *Groundwater Pollution: Technology, Economics and Management*. Volume 31, Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979, 137 pp.

FERNANDES P.G., CARREIRA P.M. e NUNES D., 2007 - *Hidrologia isotópica no Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN) – Casos de estudo*. Comunicação apresentada ao Seminário sobre Águas Subterrâneas, organizado pela APRH, Lisboa, 1 e 2 de Março de 2007, 15 pp.

FERNANDEZ P., QUINTA-NOVA L., TUJEIRA, R. e MESTRE, S., 2007 - *Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos*. POCI/AGR/59180/2004, Relatório relativo ao ano de 2006, Escola Superior Agrária de Castelo Branco, 24 pp.

FHWA , 1996 - *Evaluation and Management of Highway Runoff Water Quality*. Publicação da Federal Highway Administration n.º FHWA-PD-96-032, U.S. department of Transportation, Washington, 457 pp.

FOLKESON, L. (ed), 2000 - *Pollution from roads and vehicles and dispersal to the local environment: Monitoring of 14 case studies. POLMIT (Pollution of Groundwater and Soil by Road and Traffic Sources: Dispersal Mechanisms, Pathways and Mitigation Measures)*. RO-97-SC.1027. EC Transport RTD Programme of the 4<sup>th</sup> Framework Programme. Draft report, Deliverable D3.

FOLKESON, L., BAEKEN, T., BRENČIČ, M., DAWSON, A., FRANCOIS, D., KURIMSKA, P., LEITÃO, T., LIČBINSKY, R., VOJTEČEK, M., 2008 - *Capítulo 6 - Contaminants of Water in the Pavement*. In: Dawson, 2008: "Water Movement in Road Pavements and Embankments". Springer Verlag (in press).

FREEZE, R. A. e CHERRY, J. A., 1979 - *Ground Water*. Prentice-Hall Inc., USA, New Jersey, 604 pp.

FRIED, J.J., 1975 - *Groundwater Pollution. Theory, Methodology, Modelling and Practical Rules*. Developments in Water Science n.º 4, Elsevier Applied Science, Holanda, 330 pp.

GAMBOLATI, G., PANICONI, C. e PUTTI, M., 1993 - *Numerical Modeling of Contaminant Transport in Groundwater*, in "Migration and Fate of Pollutants in Soils and Subsoils", Eds. D. Petruzzelli e F.G. Helfferich, Nato ASI Series, Series G: Ecological Sciences, Vol. 32, Berlin, Springer-Verlag, 1993, 31 pp.

GARCÍA, R. e MILLÁN, E., 1994 - *Heavy Metals Contents from Road Soils in GUIPÚZCOA (Spain)*. *The Science of the Total Environment* 146/147: 157-161.

GARDIN, D., 1998 - *Aérodromes et Environnement. Argumentaire: Eléments de Réponse a quelques Questions Fréquemment Posées sur le Bruit, la Pollution, la Sécurité et les Projets D'infrastructures*. Service des Bases Aériennes, 77 pp.

GLEICK, P.H., SINGH, A. e SHI, H., 2001 - *Threats to the World's Freshwater Resources*. Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security (<http://www.pacinst.org> e <http://www.worldwater.org>), Oakland, California, 59 pp.

GLEICK, P.H., SINGH, A. e SHI, H., 2001 - *Threats to the World's Freshwater Resources*. Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security (<http://www.pacinst.org> e <http://www.worldwater.org>), Oakland, California, 59 pp.

GUERREIRO, N. e PEREIRA, P.B., 2002 - *Contaminação e Qualidade da Água*. Lisboa, Instituto da Água, 2002, 506 pp., ISBN 972-9412-61-8.

HARRISON R.M., LAXEN D.P.H. e WILSON S.J., 1981 - *Chemical Association of Lead, Cadmium, Copper and Zinc in Street Dusts and Roadside Soils*. *Environmental Science & Technology* 1981, 15: 1378-1383.

HERBKE, N., DWORAK, T. e KARACZUN, Z.M., 2005 - *WFD and Agriculture – Analysis of the Pressures and Impacts. Broaden the Problem's Scope*. Versão 3, Outubro de 2005, 49 pp.

HILDING-RYDEVIK, T. e JOHANSSON, I., 1997 - *How to Cope with Degrading Groundwater Quality in Europe*. International Workshop at Johannesburg, Sweden, Swedish Council for Planning and Coordination of Research, ISSN 0348-3991, 141 pp.

HIRD, A. *et al.*, 2000 - *POLMIT Pollution of Groundwater and Soil by Road and Traffic Sources: Dispersal Mechanisms, Pathways and Mitigation Measures*. Final Report.

HISCOCK, K.M., LLOYD, J.W. e LERNER, D.M., 1991 - *Review of Natural and Artificial Denitrification of Groundwater*. *Water Research*, Vol. 25, n.º 9, pp. 1099-1111.

HOOKEY, J., ASCHAUER, A., GOROVA, R.B. FRITSCHÉ, J., DAHL, M., LOIGU, E. PAUWELS, H., BERTIN, S., SIMONFFY, Z., RUISI, Z., TRAVERSA, M., WITCZAK, S., KANIA, J., MELO, T., 2006 - *BRIDGE: Background cRiteria for the Identification of Groundwater thresholds - D10: Impact of Hydrogeological Conditions on Pollutant Behaviour in Groundwater and Related Ecosystems. Volume 2*. Projecto co-financiado pela Comissão Europeia, 6.º Programa-Quadro (2002-2006), 204 pp. <http://www.nea.fr/html/dbtdb/pubs/book-pdf/593-622.pdf>

INAG, 2005 - *Relatório Síntese sobre a Caracterização das Regiões Hidrográficas prevista na Directiva-Quadro da Água*. Lisboa, Instituto da Água, 2005.

INAG, 2007 - *Relatório do Estado do Abastecimento de Água e da Drenagem e Tratamento de Águas Residuais. Sistemas Públicos Urbanos. Campanha INSAAR 2005*. Instituto da Água, Abril de 2007, 150 pp.

INSAAR 2005 - ver INAG, 2007

IPCC, 2007 - *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

JACOBS, K., ADAMS, B. E GLEICK, P., 2001 - *The Potential Consequences of Climate Variability and Change for the Water Resources of the United States*, Capítulo 14, pp. 405 a 435, in "Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change", National Assessment Synthesis Team, US Global Change Research Program, Cambridge University Press, Cambridge UK, 620 pp.

JAMES, C., 1999 – *The Impact of Pollutants from Roads and Vehicles on the Local Natural Environment*. POLMIT Project Report, PR/SE/603/99, RO-97-SC.1027. Transport Research Laboratory, 1999, 131 pp.

JORGRNSEN, N.O. e BANOENG-YAKUBO, B.K., 2001 - *Environmental isotopes  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  as tool in groundwater investigations in the Keta Basin, Ghana*. Hydrogeology Journal (2001) 9:190-201.

KIRSCH, R., RUMPEL, H.M., SCHEER, W. e WIEDERHOLD, H., 2006 - *Groundwater Resources in Buried Valleys. A Challenge for Geosciences*. Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA-Institut), Hannover, Alemanha, 299 pp.

LAMBÁN, J. e CUSTODIO, E., 1999 - *Estudio isotópico ambiental ( $^{18}\text{O}$ -D) en la Unidad Anoia: principales zonas de recarga e implicaciones en el funcionamiento hidrogeológico del sistema*. Ingeniería del Agua. Vol. 6, n.º 2, pp. 139-150.

LARANJEIRA, I. e LEITÃO, T., 2008 - *Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos. Análise do Impacte dos Fogos Florestais na Qualidade Química das Águas Superficiais e Subterrâneas das Áreas de Estudo da Região Centro*. 3.º Relatório de Progresso relativo ao ano de 2007. LNEC – NAS, Lisboa, Portugal.

LE DEAN, A., TABARD, L. e LEGRET, M., 1995 - *Pollution des eaux de ruissellement sur les aéroports, origine et traitement*. Étude bibliographique, LCPC, STBA, 129 pp.

LEE, A.J. e LEE, G.F., 1993 - *Groundwater Pollution by Municipal Landfills: Leachate Composition, Detection and Water Quality Significance*. Sardinia 93 International Landfill Symposiums, Margherita di Pula, Itália, 11-15 de Outubro de 1993, 10 pp.

LEE, G.F. e JONES, R.A., 1983 - *Guidelines for Sampling Ground Water*. Journal WPCF, volume 55, Number 1, pp. 92 - 96.

LEE, G.F. e JONES-LEE, A., 2005 - *Municipal Solid Waste (MSW) Landfill Closure and Postclosure Issues*. Relatório de Fred Lee & Associates El Macero, CA, 10 pp.

LEGRET M. e PAGOTTO C., 1999 - *Heavy Metal Dispersion and Soil Pollution alongside two French Highways*. Etudes et Recherches des LCPC, 16 pp.

LEGRET, M. e THIRIONET, O., 1999 - *Qualite des Eaux de Ruissellement sur Trois Aeroports Français: Nantes-Atlantique, Marseille-Provence et Lyon-Satolas*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 223, Ref.4267-PP.71-84.

LEGRET, M., TABARD, L. e LE DEAN, A., 1999 - *Pollution des eaux de ruissellement sur les aéroports, origine et traitement*. Étude bibliographique, LCPC, STBA, 4 pp.

LEITÃO, T.E., 1997 - *Metodologias para a Reabilitação de Aquíferos Poluídos*. Tese de Doutoramento desenvolvida no LNEC e apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, publicada nas Teses e Programas de Investigação do LNEC, TPI 11, ISBN 972-49-1733-9, Lisboa, 1997, 493 pp.

LEITÃO, T.E., BARBOSA, A.E. e TELHADO, A.M., 2005b - *Proposta de uma Metodologia para a Identificação de Zonas Hídricas Sensíveis aos Poluentes Rodoviários*. Revista Tecnologia da Água, Edição II, Outubro de 2005, pp. 44 a 53 (Comunicação apresentada ao 7.º SILUSBA, organizado pela APRH, Évora, 30 de Maio a 2 de Junho de 2005).

LEITÃO, T.E., BARBOSA, A.E., HENRIQUE, M.J., IKÄVALKO, V.M., MENEZES, T., 2005a - *Avaliação e Gestão Ambiental das Águas de Escorrência de Estradas*. Relatório Final. 109/05 NAS/DHA, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 243 pp.

LEITÃO, T.E., HENRIQUES, M.J. e BARBOSA, A. E., 2008 - *Avaliação da Eficácia das Medidas de Minimização de Impactes Ambientais Implementadas em Portugal. Recursos Hídricos e Solos. Relatório Final*. Relatório 199/08 - NAS, LNEC, 98 pp.

LEITÃO, T.E., LEHMANN, N., SMETS, S., LOBO FERREIRA, J.P.C. HOLM, P., 2000a - *WP2/4 Pollution from Roads and Vehicles and Dispersal to the Local Environment: Mass Flux and Mass Balance Calculations; Assessment of Pollution of Groundwater and Soils by Road and Traffic Sources*. LNEC e VKI, Abril de 2000, 47 pp.

LEITÃO, T.E., LOBO FERREIRA, J.P., SMETS, S. e DIAMANTINO, C., 2000b - *A Poluição Ambiental Causada por Estradas. O Projecto POLMIT*, in "A Qualidade Rodoviária na Viragem do Século", Vol. I, pp. 27-38.

LEITÃO, T.E., LOBO FERREIRA, J.P.C. e DIAMANTINO, C., 1999 - *POLMIT - Pollution of Groundwater and Soil by Road and Traffic Sources: Dispersal Mechanisms, Pathways and Mitigation Measures*. 2.º Relatório de Progresso 230/99 - GIAS/DH, LNEC, Lisboa, Outubro de 1999, 97 pp.

LOBO FERREIRA, J.P., 1981 - *Modelação Matemática do Balanço Hídrico Sequencial Diário. Exemplo de Aplicação à Região Algarvia (Faro)*. Comunicação ao Seminário "Os recursos hídricos subterrâneos e a sua utilização. O caso do Algarve". Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos.

LOBO FERREIRA, J.P., 1991 - *Plano para a Gestão dos Recursos Hídricos da Ilha de S. Miguel - Açores. Avaliação da Recarga dos Aquíferos da Ilha de S. Miguel*. Relatório 239/91 - GIAS.

LOBO FERREIRA, J.P., 2000 - *Inventariando, Monitorizando e Gerindo de Forma*

*Sustentável Recursos Hídricos Subterrâneos. A Situação Portuguesa, os Desafios da União Europeia e a Globalização*. Lisboa, LNEC, Teses e Programa de Investigação n.º 14, 431 pp.

LOBO FERREIRA, J.P., DIAMANTINO, C., OLIVEIRA, M.M. e LEITÃO, T.E., 2007 - *Gabardine - Second Interim Activity Report - LNEC Activity*. Junho. 32 pp.

LOBO FERREIRA, J.P., LEITÃO, T.E., OLIVEIRA, M.M., ROCHA, J.S., BARBOSA, A.E., MENAIA, J., ROSA, M.J. e VIEIRA, P., 2008 - *Guia Técnico n.º 11: Protecção das Origens Superficiais e Subterrâneas nos Sistemas de Abastecimento de Água*. LNEC e IRAR.

LOBO FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M., FERNANDEZ, P., QUINTA-NOVA, L., LOPES, M.H., PARALTA, E., FRANCÉS, A. e LARANJEIRA, I., 2006 - *Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos. Relatório de Execução Material de 2005*. POCI/AGR/59180/2004, LNEC.

LOBO FERREIRA, J.P.C. e OLIVEIRA, M.M., 1993 - *Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Caracterização dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Portugal*. Relatório 179/93 - GIAS. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 295 pp.

LOBO FERREIRA, J.P.C., 1982 - *Mathematical Model for the Evaluation of the Recharge of Aquifers in Semiarid Regions with Scarce Hydrogeological Data*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória n.º 582, 1982.

LOBO FERREIRA, J.P.C., 1988 - *A Comparative Analysis of Mathematical Mass Transport Models and Tracer Experiments for Groundwater Pollution Studies*. Tese apresentada à Technische Universität Berlin, para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Memória n.º 724, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 195 pp.

LOBO FERREIRA, J.P.C., OLIVEIRA, M.M., CIABATTI, P., 1995 - *Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Volume I*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995, 525 pp.

LOPES, M. H., 2006 - *Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos. 2.º Relatório de Progresso, POCI/AGR/59180/2004, período de Janeiro – Dezembro 2006*, INETI, Departamento de Engenharia Energética e Controlo Ambiental, 15 pp.

MARECOS DO MONTE, M.H., 1994 - *Contributo para a Utilização de Águas Residuais Tratadas para Irrigação em Portugal*. Tese de Doutoramento realizada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil e apresentada no Instituto Superior Técnico, 508 pp.

MARTINS, A., FREIRE, J., SOUSA, J., RIBEIRO, A., 2006 - *Potencialidades de Reutilização de Águas Residuais para Rega de Campos de Golfe na Região do Algarve*. Apresentação efectuada ao "V Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación de Aguas: Cuencas Compartidas. Claves para la Gestión Sostenible del Agua y del Territorio". Faro 4-8 de Dezembro de 2006, 12 pp.

MATOS, J., PORTELA, M. e MOURATO, S., 1999 - *Reabilitação da Bacia de Decantação de Fátima*. Parecer Técnico, IST- BRISA, Lisboa, 58 pp.

MELO BAPTISTA, J., ALMEIDA, M.C., VIEIRA, P., MOURA E SILVA, A.C., RIBEIRO, R., FERNANDO, R.M., SERAFIM, A., ALVES, I. e CAMEIRA, M.R., 2001 - *Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água*. Relatório do LNEC para o INAG. 204 pp.

MENDONÇA, J.L., 1998 - *Caracterização Hidrogeológica e Contaminações de Alguns Sistemas Aquíferos de Portugal*. 4.º Congresso da Água, organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 1998, 11 pp.

MERAIN, E., 1991 - *Metals and Their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis, and Biological Relevance*, VCH, Weinheim, 1438 pp.

MEUS, P., PIRON, L., PAUWELS, H., SIMONFFY Z., RUISI, M., TRAVERSA, P., DOMENICANTONIO, A., WALRAEVENS, K., COETSIERS, M., VAN CAMP, M., WENDLAND, F., FRITSCHÉ, J., WOLTER, R., MARANDI, A., MIRALDO, C., SENA, C., MELO, M.T., NAVARRETE, C., GÓMEZ, J., HOOKEY, J., e ROSSITZA, G., 2006 - *BRIDGE: Background cRiteria for the Identification of Groundwater thresholds - D10: Impact of Hydrogeological Conditions on Pollutant Behaviour in Groundwater and Related Ecosystems. Volume 1*. Projecto co-financiado pela Comissão Europeia, 6.º Programa-Quadro (2002-2006), 158 pp.

MIRANDA, P.M.A., VALENTE, M.A., TOMÉ, A.R., TRIGO, R., COELHO, M. F. E. S., AGUIAR, A. e AZEVEDO, E.B., 2006 - *O Clima de Portugal nos Séculos XX e XXI*, in "Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação". Projecto SIAM II, eds. F.D. SANTOS e P.MIRANDA, pp. 45-113.

MORELL, I., CRUZ, J.V., PULIDO-BOSCH, A., DANIELE, L. e RENAU, A., 2002 - *Isótopos del boro en las aguas termales de la isla de San Miguel (Azores, Portugal)*. Trabalho realizado no âmbito do Projecto HID 1999-0597-CO2 de MCyT.

MORRIS, B.L., LAWRENCE, A.R.L., CHILTON, P.J.C., ADAMS, B., CALOW, R.C. e KLINCK, B.A., 2003 - *Groundwater and its Susceptibility to Degradation: A Global Assessment of the Problem and Options for Management*. Early Warning and Assessment Report Series, RS. 03-3. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

MULL, R., BUGNER, C., HÄRIG, F., PFINGSTEN, W. e PIELKE, M., 1991 - *Nitrate Balances in Aquifers*, in "Nitrate Contamination: Exposure, Consequences and Control", Eds. I. Bogárdi e R.D. Kuzelka, Nato ASI Series, Series G: Ecological Sciences, Vol. 30, Berlim, Springer-Verlag, 1991, pp. 129-139.

NASCIMENTO, J., RIBEIRO, L., CUNHA, L.V. e OLIVEIRA R., 2004 - *Impacto das Alterações Climáticas nos Recursos Hídricos Subterrâneos de Portugal Continental. Alguns resultados preliminares*. 7.º Congresso da Água, organizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2004, 15 pp.

NASCIMENTO, J., RIBEIRO, L., CUNHA, L.V., e OLIVEIRA, R., 2005 - *Efeitos das Alterações Climáticas na Disponibilidade Hídrica e na Qualidade da Água Subterrânea da Região Alentejo*. Comunicação apresentada ao 7.º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Évora, 16 pp.

NEVES, E.B., RIBEIRO, R., LEITÃO, T.E., ANTÃO P., LOPES, G., MARCELINO, J.,

CARRILHO, F.P. e BARROSO, M., 2000 - *Elaboração de Normas Técnicas de Gestão de Tecossistemas de Confinamento de Resíduos Urbanos. Manual de Apoio ao Projecto, à Construção e à Exploração*. 5.º Relatório - Versão Final. 184/00 - GIAmb/DH, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Julho de 2000, 173 pp.

NIELSEN, D.M., 1991 - *Practical Handbook of Ground-Water Monitoring*. Chelsea, Michigan, Lewis Publishers Inc., 1991, 660 pp.

NJDEP - *2<sup>nd</sup> Draft Guidance Manual: Best Management Practices for Golf Course Construction and Operation in New Jersey* (<http://www.state.nj.us/drbc/golfcourses.pdf>).

NORRSTRÖM, A.C. e JACKS, G. 1998 - *Concentration and Fractionation of Heavy Metals in Roadside Soils Receiving Deicing Salts*. Science of the Total Environment 218: 161-74.

NOVO, M. E., 2003 - *Alterações Climáticas e seus Impactos nos Recursos Hídricos Subterrâneos em Ilhas (Caso de Estudo: Açores)*. 2.º Relatório de Progresso. Relatório 112/03 - NAS, LNEC, Lisboa, Maio de 2003, 112 pp.

NOVO, M. E., 2007 - *Alterações Climáticas e seus Impactos nos Recursos Hídricos Subterrâneos em Ilhas de Pequena Dimensão (Caso de Estudo: Açores – Ilha Terceira)*. Tese de Doutoramento em Engenharia do Ambiente, Angra do Heroísmo, Fevereiro de 2007, 290 pp.

NOVO, M. E. e LOBO FERREIRA, J.P., 2008a - *Alterações climáticas e seus impactos em recursos hídricos subterrâneos de zonas insulares - Recarga de aquíferos*. CLIMA 2008 - 1.º Congresso Nacional de Alterações Climáticas, poster.

NOVO, M. E. e LOBO FERREIRA, J.P., 2008b - *Alterações climáticas e seus impactos em recursos hídricos subterrâneos de zonas insulares - Vulnerabilidade de aquíferos*. CLIMA 2008 - 1.º Congresso Nacional de Alterações Climáticas, poster.

OECD, 1993 - *Towards Sustainable Development: Environmental Indicators*. Organisation for Economic Co-operation and Development, 1993, Paris.

O'LEARY, P. e WALSH, P., 2008 - *Introduction to Solid Waste Landfills*. Course on Solid and Hazardous Waste Education Center, University of Wisconsin-Madison ([http://www.scu.edu.au/staff\\_pages/mcullen/wt\\_lect9.html](http://www.scu.edu.au/staff_pages/mcullen/wt_lect9.html)).

OLIVEIRA, L. G. S., 2007 - *Soluções para uma Gestão Adequada de Bacias Hidrográficas e de Sistemas Aquíferos, em Cenários de Escassez Hídrica Extrema*. Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil e apresentada ao Instituto Superior Técnico para a obtenção do grau Mestre em Engenharia do Ambiente. Lisboa, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa.

OLIVEIRA, M.M., 2001 - *A Estimativa da Recarga das Águas Subterrâneas a Partir da Decomposição de Hidrogramas de Escoamento Superficial – O Programa de Computador DECHIDR\_VB.VBP*. Seminário sobre "A Hidroinformática em Portugal", LNEC, Lisboa, 15-16 Novembro, 2001, Publicação em CD-ROM.

OLIVEIRA, M.M., 2004 - *Recarga de Águas Subterrâneas: Métodos de Avaliação*. Lisboa: Tese de Doutoramento em Hidrogeologia na Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências,

Departamento de Geologia, LNEC, 2004.

OLIVEIRA, M.M., MOINANTE, M.J. e LOBO FERREIRA, J.P., 1997a - *Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com Base na Aplicação do Método DRASTIC*. Relatório Final. Lisboa, LNEC, Relatório 60/97-GIAS, 535 pp.

OLIVEIRA, M.M., MOINANTE, M.J. e LOBO FERREIRA, J.P., 1997b - *Determinação da Recarga de Águas Subterrâneas a Partir da Análise de Hidrogramas de Escoamento*. Seminário sobre Águas Subterrâneas, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, 10 a 12 de Dezembro de 1997.

OLIVEIRA, M.M., NOVO, M.E., LOBO FERREIRA, J.P., 2007 - *Models to predict the impact of the climate changes on aquifer recharge*. In Lobo Ferreira, J.P; Vieira, J. (eds) – "Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability", IAHS Red Books, London, IAHS Publication 310, ISBN 978-1-901502-88-6, pp. 103-110.

OLIVELLA, M.A., RIBALTA, T.G., FEBRER, A.R., MOLLET, J.M., LAS HERAS, F.X.C., 2005 - *Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riverine Waters after Mediterranean Forest Fires*. The Science of the Total Environment 355, 156-166.

PAGOTTO C., RÉMY N., LEGRET M. e LE CLOIREC P., 2001 - *Heavy Metal Pollution of Road Dust and Roadside Soil near a Major Rural Highway*. Environmental Technology 22: 307-319.

PDR 2007-2013 - *Plano Estratégico Nacional do Desenvolvimento Rural 2007-2013*, MADRP, 2007, 93 pp.

PEAASAR, 2006 - *PEAASAR 2007/13 - Plano Estratégico de Abastecimento de Águas e Saneamento de Águas Residuais*, 171 pp.

PERSU II, 2007 - *Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos 2007 - 2016*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. 1997, 194 pp.

PERSU, 1997 - *Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos*. Ministério do Ambiente. 1997, 146 pp.

PHOENIX, 2007 - *Possible Research Directions in Natural Hazards Research*. Wildfire research (in the context of climate change and multi-hazard perspectives).

PIRES, A., 2006 - *Plano Estratégico Sectorial de Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU)*. Apresentação PowerPoint disponível em ([http://www.cmia-viana-castelo.pt/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=25](http://www.cmia-viana-castelo.pt/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=25)).

PLUMLEE, G.S., MARTIN, D.A., HOEFEN, T., KOKALY, R., HAGEMAN, P., ECKBERG, A., MEEKER, G.P., ADAMS, M., ANTHONY, M., and LAMOTHE, P.J., 2007 - *Preliminary Analytical Results for Ash and Burned Soils from the October 2007 southern California Wildfires*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2007 – 1407. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Estados Unidos da América. Disponível em [http://pubs.usgs.gov/of/2007/1407/pdf/OF07-1407\\_508.pdf](http://pubs.usgs.gov/of/2007/1407/pdf/OF07-1407_508.pdf)



PNPOT PA, 2006 - *Programa de Acção do Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território*, MAOTDR, Fevereiro de 2006, 96 pp.

PNPOT, 2006 - *Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território*, anexo à Lei n.º 58/2007, de 4 de Setembro, 155 pp.

PNUEA, 2001 - *Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água, Versão Preliminar*. Estudo elaborado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) com o apoio do Instituto Superior de Agronomia (ISA). Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e Instituto da Água, 212 pp.

PNUEA, 2001 - *Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água*. Estudo elaborado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) com apoio do Instituto Superior de Agronomia (ISA). Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, Instituto da Água, 204 pp.

QUELHAS DOS SANTOS, J., 2000 - *Campos de Golfe: a Fertilização e a Qualidade do Ambiente*. Comunicação apresentada ao VI Congresso da Associação Portuguesa de Profissionais de Espaços Verdes, 13 pp.

QUEVAUVILLER, P., 2005 - *Groundwater monitoring in the context of EU legislation: reality and integration needs*. Journal of Environmental Monitoring.

RACKHAM, O., 2003 - *Fire in the European Mediterranean*. Fire ecology 1, 54. Disponível em <http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln54/rackham.html>

RANALLI, A. J., 2004 - *A Summary of the Scientific Literature on the Effects of Fire on the Concentration of Nutrients in Surface Waters*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Estados Unidos da América.

REINIRKENS, P., 1996 - *Analysis of Emissions through Traffic Volume in Roadside Soils and Their Effects on Seepage Water*. The Science of the Total Environment 189/190: 361-369.

RIBEIRO, L., 2004 - *Recursos Hídricos Subterrâneos de Portugal Continental*. Instituto da água, Direcção de Serviços e Planeamento.

RODRIGUEZ-ARÉVALO J., CASTAÑO S., DÍAZ-TEIJEIRO M.F., MARCOS L.A. e VÁZQUEZ-MARROQUÍN, 2007 - *Modelo de distribución espacial continua de <sup>18</sup>O en la precipitación en la provincia de Burgos. Desarrollo de la metodología y aplicación en hidrología*. Geogaceta, 42 (2007), 79-82.

RUSSO, M.A.T., 2005 - *Avaliação dos Processos de Transformação de Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro Sanitário*. Tese de Doutoramento da Universidade do Minho, 298 pp.

SÁNCHEZ-CAMAZANO, M., SÁNCHEZ-MARTIN, M.J. e LORENZO, L.F., 1994 - *Lead and Cadmium in Soil and Vegetable from Urban Garden Salamanca (Spain)*. The Science of the Total Environment 146/147: 163-168.

SANSALONE, J.J. e BUCHBERGER, S.G., 1997 - *Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water*, in "Journal of Environmental Engineering", pp. 327-323.

SANTOS, F.D. e MIRANDA, P., 2006 - *Alterações Climáticas em Portugal. Cenários*,

*Impactos e Medidas de Adaptação*. Projecto SIAM II, Gradiva, Lisboa, 506 pp.

SANTOS, F.D., FORBES, K. e MOITA, R., 2001 – *Mudança Climática em Portugal. Cenários, Impactes e Medidas de Adaptação* – SIAM. Sumário Executivo e Conclusões, Gradiva, Lisboa, 24 pp.

SANTOS, F.D., FORBES, K. e MOITA, R., 2002 - *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*. Projecto SIAM I, Gradiva, Lisboa, 454 pp.

SGE, 1991 - *Situación de la Contaminación por Nitratos en las Aguas Subterráneas del Territorio Peninsular y Balear*. Servicio Geológico de España, Informaciones y Estudios, nº 53, Madrid, Centro de Publicaciones del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1991, 71 pp.

SIAM I - ver Santos, Forbes e Moita, 2002.

SIAM II - ver em Santos e Miranda, 2006.

SOLANES, M.R., 1989 - *Water Pollution Control: Legal, Economic and Institutional Issues*, in Proceedings do Simpósio Internacional "Integrated Approaches to Water Pollution Problems", Eds. Bau, J., Lobo Ferreira, J.P.C., Henriques, J.D. e Raposo, J.O., England, Elsevier Applied Science, 1989, pp. 101-114.

SOVERAL DIAS, J.C., 1994 - *Código de Boas Práticas Agrícolas*. Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva, 55 pp.

TAVARES, T., 2007 - *A Directiva 2006/118/CE relativa à Protecção das Águas Subterrâneas contra a Contaminação e a Deterioração: Suas Implicações na Agricultura*. Apresentação oral efectuada na Sessão Técnica sobre a Directiva das Águas Subterrâneas, organizada pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 13 de Fevereiro de 2007.

TODD, D.K., 1959 - *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons, 1959, 319 pp.

TRL, 2002 - *Pollution from Roads and Vehicles and Dispersal to the Local Environment: Final Report and Handbook. 2002. Deliverable D5. POLMIT, Pollution of Groundwater and Soil by Road and Traffic Sources: dispersal mechanisms, pathways and mitigation measures*. RO-97-SC.1027. Transport Research Laboratory. (publicação electrónica).

USDA - United States Department of Agriculture, 2005 - *Wildland Fire in Ecosystems – Effects of Fire on Soil and Water*. Rocky Mountain Research Station, Estados Unidos da América.

Vall, M.P. e Vidal, C., 1999 - *Nitrogen in agriculture*.

[http://europa.eu.int/comm/agriculture/envir/report/en/nitro\\_en/report.html](http://europa.eu.int/comm/agriculture/envir/report/en/nitro_en/report.html).

VAN DIJK, H.F.G., GUICHERIT, R., 1999 - *Atmospheric Dispersion of Current-Use Pesticides: a Review of the Evidence from Monitoring Studies*. Water, air and soil pollution, Vol. 115. pp. 21-70.

VRBA, J. and LIPPONEN, A., 2007 – *Groundwater Resources Sustainability Indicators*. International Hydrological Programme – VI. Series on Groundwater, n.º 14, UNESCO, IHP/2007/GW-14.

WANIELSITA, P.W., e YOUSEF, Y. A., 1993 - *Stormwater Management*, John Wiley & Sons, Inc., USA, Canada, 579 pp.

WANIELSITA, P.W., e YOUSEF, Y. A., 1993 - *Stormwater Management*, John Wiley & Sons, Inc., USA, Canada, 579 pp.

WARD N.I., 1990b - *Multielement Contamination of British Motorway Environments*. The Science of the Total Environment 93: 393-401.

WARD, N.I. e SAVAGE, J.M., 1994 - Metal Dispersion and Transportational Activities using Food Crops as Biomonitors. The Science of the Total Environment 146/147: 309-319.

WARD, N.I., 1990a - *Lead Contamination of the London Orbital (M25) Motorway (since its opening in 1986)*. The Science of the Total Environment 93: 277-283.

WHO, 1987 - *Groundwater Pollution Risk Assessment: A Methodology Using Available Data*. World Health Organization. Pan American Health Organization, 1987, 73 pp.

WILLIAM E. MOTZER, W.E. e TODD ENGINEERS P.G., 2007 - *Tritium Age Dating of Groundwater*. HydroVision, Summer 2007, Groundwater Resources Association of California, Volume 16, N.º 2

WWDR, 2003 - *Water for People, Water for Life*. The United Nations World Water Development Report, 36 pp. (<http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556e.pdf>)

WWDR 2, 2006 - *Water a Shared Responsibility* - The United Nations World Water Development Report 2, 601 pp. (<http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr2/>).

XANTHOPOULOS, G., CABALLERO, D., GALANTE, M., ALEXANDRIAN, D., RIGOLOT, E. e MARZANO, R., 2006 - *Forest Fuels Management in Europe*. Proceedings do USDA Forest Service, RMRS-P-41.

YONG, R.N., MOHAMED, A.M.O. e WARKENTIN, B.P., 1992 - *Principles of Contaminant Transport in Soils*. Developments in Geotechnical Engineering, 73, Holanda, Elsevier Science Publishers B.V., 1992, 327 pp.



Quadro Anexo – Condições preferenciais de aplicação de modelos numéricos em águas subterrâneas (extraído de Diamantino, Lobo Ferreira e Novo, 2005)

Model	Type of Model			Type of Mathematical Approach			Saturation conditions			Vadose Zone
	Flow	Transport	Flow and Transport	Finite Differences	Finite Elements	Analytical	Saturated	Unsaturated	Saturated/Unsaturated	
AQUA3D	X	X	X	-	X	-	X	-	-	-
ASMWIN	X	X	X	X (1)	-	-	X	-	-	-
FEFLOW	X	X	X	-	X	-	X	X	X	X
FLOWPATH II	X	X	X	X (1a)	-	-	X	-	-	-
G M S	VS2D	X	-	-	X	-	X	-	-	-
	SEEP2D	X	-	-	-	X	X	X	X	-
	MT3D/RT3D/S	-	-	X (2)	X	-	X	-	-	-
	EAM3D	-	-	X (2)	X	-	X	-	-	-
	FACT	X	X	X	X	-	X	-	-	-
	UTCHEM	X	X	X	X	-	X	X	X	X
	ART3D	-	X	-	-	-	X	-	-	-
	FEMWATER	X	X	X	-	X	-	X	X	X
	ADH	X	X	X	-	X	-	X (1b)	-	-
MIGRATE v9	-	X	-	-	-	X	X	X	X	X
MT3D	-	-	X (2)	X	-	-	X	-	-	-
POLLUTE v6	-	X	-	-	-	X	X	X	X	X
RBCA Tier	X	X	X	-	-	X (3)	X	-	-	-
RISKP RO	SESOIL	-	X	-	-	X	-	X	-	X
	AT123D	-	X	-	-	X	X	-	-	-
SOLUTRANS	-	X	-	-	-	X	X	X	-	X
TWODAN	X	-	-	-	-	X	X	-	-	-
WINTRAN	-	-	X (2a)	-	X (4)	-	X	-	-	-
WH I Un Sat	HELP	X	X	X	X	-	X	X	X	X
	PESTAN	-	X	-	-	-	X	-	X	-
	VLEACH	X	X	X	X	-	-	X	-	X
	VS2DT (5)	X	X	X	X	-	-	X	-	X
	SESOIL	-	X	-	-	-	X	-	X	-

(1) The transport, if steady state, is solved by finite differences or Random Walk, but in transient state is solved by the Random Walk method; (1a) the transport model is solved by the Random Walk method; (1b) it does surface water flow simulations as well; (2) The flow simulation is performed by MODFLOW module, that has to be run before any of these transport models can be activated; (2a) The flow simulation required to run the transport model is performed by WINFLOW module, which is embedded into WINTRAN; (3) the flow model is an analytical solver, the transport/dispersion model is solved by the Method of Characteristics (MOC) and the transport/advection is solved by the ADI method; (4) the coupled flow model – WinFlow – is an analytical model; (5) allows the simulation of flow and/or pollutant injections at several soil depths (and at several soil locations).

Model	Dimensionality			Transport regime		Decay						Adsorption		N. of Species		
	1D	2D	3D	Steady state	Transient	No decay	Simple	Complex	Radioactive	Biological	Sequential (PCE)	Equilibr.	Non Equil.	Uni	Multi	
AQUA3D	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X (a)	-	X	-	X	-	
ASWIN	X	X	-	X	X	X	X	-	-	-	-	X	-	X	-	
FEFLOW	X	X	X	X	X	X	X	-	X	-	-	X	X	X	X	
FLOWPATH II (1)	X	X	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	X	-	
G M S	VS2D	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	SEEP2D	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	MT3D/RT3D	X	X	X	X	X	X	X	X	X (b)	X	X	X	X	X	
	/SEAM3D	X	X	X	X	X	X	X	X	X (b)	-	X	X	X	X	
	FACT	X	X	X	X	-	X	-	-	-	-	-	-	X	-	
	UTCHEM	X	X	X	X	X	X	X	-	-	X (b)	-	X	X	X	X
	ART3D	X	X	X	X	-	X	X	-	X	-	-	X	-	X	X
	FEMWATER	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	X	-	X	-
ADH	X	X	X	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-	
MIGRATE v9 (c)	X	X	-	X	X	X	X	-	X	X (a)	-	X	X	X	-	
MT3D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
POLLUTE v6 (c)	X	-	-	X	X	X	X	-	X	X (a)	-	X	X	X	-	
RBCA Tier	X	X	-	X	-	X	X	X	X	X (b)	X	X	X	X	X	
RISK PRO	SESOIL	X	-	-	X	X	X	-	-	X	-	X	X	X	X (d)	
	AT123D	X	X	X	X	X	X	-	X	-	-	X	X	X	X (d)	
SOLUTRANS	X	X	X (2)	X	-	X	X	-	X	-	-	X	X	X	-	
TWODAN	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
WINTRAN	X	X	-	X	-	X	X (3)	-	X	-	-	X	-	X	-	
WH I Un Sat	HELP	X	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	
	PESTAN	X	-	-	X	-	X	X	-	-	-	X	-	X	X (d)	
	VLEACH	X	-	-	X	-	X	-	-	-	-	X	-	X	X (d)	
	VS2DT	X	X	-	X	X	X	X	-	X	-	X	-	X	-	
SESOIL	X	-	-	X	X	X	X	-	-	X	-	X	X	X	X (d)	

(1) The pollutants input (at least in the demo) related to a well or any other source type is performed through “Initial Concentration” menu; (2) the model assumes flow as 1D **only** and it is **only transport** that can be simulated for 1D, 2D or 3D conditions; (3) performs these simulations only and if the chemical decay constants are transformed into half-lives; (a) refers to simple biological decay; (b) here it is being considered as well the (more or less complex) biodegradation processes; (c) simulates 1D, 2D and 3D fractures, and the 1D condition is used to solve the advection-dispersion equation; (d) refers to multi-phase cases.

Model	NAPL's (Oil, Hydrocarbons, etc.)	Pesticides/ Leachates	BTEX	Gas	Thermal	Microbial Processes	Salt Water
AQUA3D	-	-	-	-	X	-	-
ASMWIN	-	-	-	-	-	-	-
FEFLOW	X	X	-	X	X	-	X
FLOWPATH II	-	-	-	-	-	-	-
GMS	VS2D	-	-	-	-	-	-
	SEEP2D	-	-	-	-	-	-
	MT3D/RT3D//S	-	X	X	-	-	-
	EAM3D	X	-	-	-	X	-
	FACT	-	-	-	-	-	-
	UTCHEM	X	-	-	X (1)	X (1)	X (a)
	ART3D	-	-	-	-	-	-
	FEMWATER	-	-	-	-	-	X
ADH	-	-	-	-	-	-	
MIGRATE v9	-	X (2)	-	-	-	-	
MT3D (3)	-	X	X	-	-	X	-
POLLUTE v6	-	X (2)	-	X	-	-	-
RBCA Tier	-	-	X	-	-	X	-
RISK PRO	SESOIL (4)	X	X	-	X	-	X
	AT123D	X	-	-	-	X	-
SOLUTRANS	-	-	-	-	-	-	-
TWODAN	-	-	-	-	-	-	-
WINTRAN	-	-	-	-	-	-	-
WHI UnSat	HELP	-	X (5)	-	-	-	X
	PESTAN	-	X (5)	-	-	-	-
	VLEACH	-	X (6)	-	X (6a)	-	-
	VS2DT	-	X (7)	-	-	-	-
	SESOIL (4)	X	X	-	X	-	X

(1) Transport options for this type of pollution are not available – neither are transport and reactions concerning polymers, gel reactions and tracers reactions – **in the GMS version**;  
(2) the organic compounds leached from landfills are the ones considered by the model; (3) Visual MODFLOW 2.8.2 version, in which MT3D150, MT3D96, MT3D99, MT3DMS E RT3D models are included; (4) it also performs the following reactions: Hydrolysis, Complexation, Volatilization and Ionic Exchange; (5) and other organic water soluble compounds; (6) it simulates also organic volatile compounds partitioning between solid, liquid and gas phases; (6a) it is considered here the pollutant transport as gas in a vapour phase and Volatilization from soil boundaries; (7) it also simulates Cationic Exchange cases; (a) it acknowledges density effects on pollutant transport for different contaminant's (water, oil, surfactants, etc) densities as well as gravity and viscosity differences.

Model	Flow Regime		Types of Structures that can be Modelled							Type of Aquifer				Soil processes	Anisotropy	Heterogeneity	
	Steady state	Transient	Wells	Drains	Walls	Rivers	Recharge	EVR	Flow boundaries	Confined	Non confined	Leaky	Multi aquifer				
AQUA3D	X	X	X	X	X	X (1)	X	-	X	X	X	X	X	-	X	X	
ASMWIN	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	-	-	-	X	X	
FEFLOW	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	
FLOWPATH II	X	-	X	X	X	X (1)	X	X	X	X	X	X	-	-	X	X	
G M S	VS2D	X	X	-	-	-	-	X	X	X	X	X	-	-	-	-	X
	SEEP2D	X	-	-	X	X	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-	X
	MT3D/RT3D /SEAM3D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X
		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X
	FACT	X	X	X	-	-	-	X	-	X	X	X	-	X	-	-	X
	UTCHEM	X	X	X	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-	X
	ART3D	X	-	X	X	X	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-
	FEMWATER	X	X	X	X	-	X	-	-	X	X	X	-	X	-	X	X
ADH (5)	X	-	X	-	-	X	-	-	X	X	X	-	-	-	-	X	
MIGRATE v9	X	X	-	-	-	-	X (a)	-	X	X (6)	X (6)	X (7)	X (b)	-	-	-	X
MT3D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	
POLLUTE v6	X	X	-	-	-	-	X (a)	-	X	X (6)	X (6)	X (7)	X	-	-	-	X
RBCA Tier	X	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	-	-	-	X
RISK PRO	SESOIL	X	X	-	-	-	-	X (a)	X (a)	X	-	-	-	X (b)	X	-	X
	AT123D	X	X	X (2)	X (2)	-	X (2)	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-
SOLUTRANS	X	-	X (2)	X (2)	-	X	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-	X
TWODAN	X	X	X	X	X	X (1)	X	-	X	X	X	-	X (4)	-	-	-	X
WINTRAN	X	-	X	X	X	X (1)	X	-	X	X	X	X (3)	-	-	-	-	-
W H I	HELP (5)	X	X	-	-	-	-	X	X	X	X	X	-	X (b)	-	-	X
	PESTAN	X	-	-	-	-	-	X (a)	-	X	-	-	-	-	X	-	-
	VLEACH	X	-	-	-	-	-	X (a)	-	X	-	-	-	-	X	-	-
Un Sat	VS2DT	X	X	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	X	X	X	X
	SESOIL	X	X	-	-	-	-	X (a)	X (a)	X	-	-	-	X (b)	X	-	X

(1) And/or lakes; (2) only considered by the model as injection sources, their flow fields are not simulated; (3) simulated through the flow module WinFlow; in transient state WinFlow can simulate leaky aquifers but WinTran **demo** runs only in permanent regime, so pollutant transport in this type of aquifers cannot properly be simulated by WinTran demo; (4) allows only two layers; (5) acknowledges also surface flow; (6) acknowledges the possibility of these aquifers but only if they are located underneath the unsaturated region under simulation; (7) it refers only to leakage from landfills/buried wastes; (a) the model acknowledges these effects but does not perform any calculations concerning recharge input prediction (the user must provide such input data to the model); (b) the model acknowledges several soil layers (which can, on their turn, be divided into sub-layers), but this is distinct from a multi-aquifer and in fact can be considered only as a multi-layered